



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

Evaluación de la durabilidad del mortero proyectado frente a ataques
por sulfato

Autor

Jhomar Wladimir Jara Del Rosario

Tutores

Sergio Henrique Píalarissi Cavalaro
Carlos Herrera Mesén

Intensificación

Tecnología y Construcción

Fecha

Febrero 2015



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DE MÁSTER

Máster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Título

Evaluation of the sprayed mixtures durability under sulfate attack

Autor

Jhomar Wladimir Jara Del Rosario

Tutores

Sergio Henrique Píalarissi Cavalaro
Carlos Herrera Mesén

Intensificación

Tecnología y Construcción

Fecha

Febrero 2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por otorgarme la inteligencia, sabiduría, paciencia y salud para cursar esta etapa de mi vida acompañado por Él y apoyado por las personas importantes para mí.

Al gobierno y el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología (MESCyT) de la Republica Dominicana por cumplir mi deseo de obtener la mejor preparación a nivel profesional.

A la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), en especial a mis tutores Sergio Henrique Píalarissi Cavalero y Carlos Herrera Mesén que invirtieron tiempo y fueron de gran ayuda en el desarrollo de este trabajo. De igual forma se aprecia el esfuerzo de todos profesores que me han acogido bajo su manto de enseñanza y guía durante esta etapa que he vivido.

A mi madre María Del Rosario y mi padre José Jara por el apoyo incondicional y la confianza que siempre han depositado en mí, los Amo.

A mis hermanas Yary Jara y Yahindy Jara por su apoyo, las alegrías y las vivencias compartidas con ustedes. A mis demás familiares que sin importar donde se encuentren siempre me han mostrado cariño, aprecio y solidaridad que es el significado de la familia.

A mi novia y futura esposa Yisell Carolina del Villar García, gracias por la paciencia para afrontar nuestra relación a larga distancia por tanto tiempo, y por la fuerza que me ha transmitido quizás sin notarlo en el tiempo que he estado lejos. ¡Te Amo!

A mis amigos que me recibieron en Barcelona y compartieron conmigo Héctor Rodríguez y Rogelio Acosta, mientras ustedes estuvieron aquí, la estadía se sintió como estar en casa.

A mis amigos del máster, que iniciaron como compañero y siento el placer y orgullo de llamarlos amigos, Rubén Ccallo, Carolina Días, Víctor Gutiérrez, Paola Pérez y Kelly Piminchumo.

A mis amigos que han estado al pendiente de mis responsabilidades mientras estoy lejos Winston González y Eriol Gómez.

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra han contribuido en mi desarrollo tanto personal como profesional.

RESUMEN

Las mezclas proyectadas son mezclas cementíceas lanzadas neumáticamente sobre una superficie a alta velocidad. Las mezclas pueden ser hormigones o morteros proyectados, donde la diferencia entre ambos es el tamaño máximo de agregado que las compone, siendo menor de 4 mm para morteros y mayor de 4 mm para el hormigón. En la actualidad, se presenta la situación del incremento de la utilización de este tipo de mezclas, producto de diferentes aspectos constructivos como su velocidad de ejecución y facilidad de aplicación entre otras. Las principales aplicaciones de las mezclas proyectadas se realizan en construcciones subterráneas como el sostenimiento y reparación de túneles, en los sectores minero, hidroeléctrico y metros subterráneos. En estos ambientes se encuentra en contacto con el suelo o aguas subterráneas que pueden contener compuestos químicos que interactúan de manera nociva con la mezcla. Entre los principales agentes nocivos con los que interactúa se encuentran los sulfatos, los cuales son reconocidos por causar reacciones expansivas en mezclas con cemento portland.

El ataque por sulfatos (AS) es una forma compleja de deterioro que afecta la durabilidad de estructuras de mezclas cementíceas en todo el mundo. El AS es un término utilizado para describir un conjunto complejo de procesos químicos y físicos entre los iones de sulfato, y los componentes de las mezclas cementíceas. Existen diversos estudios en la literatura que indican ese fenómeno, pero casi todos se han realizado con mezclas convencionales, las cuales no se asemejan por su microestructura a las mezclas proyectadas. Las diferencias entre las mezclas convencionales y mezclas proyectadas son producidas por la técnica de proyección, donde la integración de aire a presión para lanzar la mezcla a gran velocidad tiene el efecto colateral de incrementar su porosidad. Producto del aumento de porosidad la calidad de la interacción cemento/árido es menor, además de que puede afectar la interacción con el acelerante utilizado para aumentar la velocidad de fraguado y resistencia a corta edad. Por ende, una investigación en esta área tiene especial importancia dado el alto riesgo de exposición que presentan las mezclas proyectadas a un AS.

El objetivo principal de esta Tesis de Máster es evaluar la durabilidad de las mezclas proyectadas cuando están sometidas a un ataque por sulfatos externo (ASE) acelerado. Para lograr el objetivo se ha diseñado un programa experimental, donde se decide trabajar con morteros proyectados debido a que son más fáciles de producir y la relación cemento/acelerante se presenta de forma similar. Además, la mayoría de los ensayos existentes en la literatura sobre AS se realizan en morteros o pastas y estos sirven como referencia comparativa. El programa experimental está dividido en dos etapas: la 1ra etapa se concentra en la producción de 126 probetas para ser evaluadas; y en la 2da se simula un ASE de manera acelerada. En el estudio se evalúa el ASE acelerado en las mezclas proyectadas en función a las siguientes variables: tipo de cemento, tipo de acelerante, dosificación de acelerante y distintas edades de exposición. Se evalúan las características físicas y mecánicas de las muestras con ensayos de porosidad y resistencia a la compresión. El seguimiento físico y químico de muestras expuestas al ASE es monitoreado con inspección visual, ensayos de expansión, ultrasonidos y DRX.

En este estudio se ha comprobado la influencia del tipo de cemento, tipo de acelerante, dosificación de acelerante y distintas edades de exposición en la durabilidad de mezclas proyectadas frente a ASE acelerado. Se estableció que las variables más importantes en la durabilidad de mezclas proyectadas frente al ASE son el tipo de acelerante y edad de exposición. En base a estos resultados, se proponen algunas recomendaciones para reducir el riesgo de daños debidos al ASE y la adecuada caracterización de este fenómeno por medio de pruebas de laboratorio.

ABSTRACT

The sprayed mixtures are cementitious mixtures pneumatically launched onto a surface at high speed. The mixtures can be designed as sprayed concrete or mortar, where the difference between them is the maximum size of aggregate in which consists, being below 4 mm for mortar and above for concrete. Nowadays, the use of the sprayed mixtures is increasing as the result of different constructive aspects such as speed and ease of application among other. The main applications of the sprayed mixtures are on underground construction and in the mining industry. In these environments the mixtures are in contact with the ground or underground waters that may contain chemical compounds that interact in harmful ways with the mixture. Among the principal hazardous agents with which it interacts are the sulfates, that are known to cause expansive reactions in mixtures with portland cement.

The sulfate attack (SA) is a complex form of deterioration that affects the durability of structures worldwide. The SA is a term used to describe a set of chemical and physical processes between sulfates ions, and cementitious mixtures components. Several studies in the literature explain this phenomenon, but almost all of them have been done with conventional mixtures, which do not resemble the microstructure of sprayed mixtures. The differences between conventional and sprayed mixtures are produced by the spraying technique. The use of pressure air to release the mixture at high speed has the side effect of increasing the mixture porosity. Because of the increased porosity, the quality of cement / aggregate interaction is reduced. In addition to that the set accelerator used to increase the setting speed and strength at an early age may also affect the repercussions of the SA. Therefore, research in this area are particularly important given the high risk posed by sprayed mixtures under SA.

The main objective of this Master thesis is to evaluate the durability of the sprayed mixtures under an external sulfate attack (ESA). To achieve this goal, an experimental program was performed with sprayed mortars since they are easier to produce and the cement/accelerator interaction occurs similarly to the expected in other sprayed cementitious mixes. Furthermore, most studies from the literature on SA are performed in mortars or pastes and these serve as a reference for comparison with the results obtained here. The experimental program is divided into two stages: the first stage focuses on the production of 126 samples to be tested; and the second stage simulates an accelerated ESA. The study evaluates the accelerated ESA on sprayed mixtures according to the following variables: type of cement, type of accelerator, accelerator dosage and exposure at different ages. The physical and mechanical characteristics of the samples are obtained with tests of porosity and compression strength. Monitoring of samples exposed to ASE is performed using visual inspection, expansion tests, ultrasound and DRX.

This study has shown the influence of the type of cement, type of accelerator, accelerator dosage and different ages exposure in the durability of sprayed mixtures under ESA. It was established that the type of accelerator and age of exposure are the most important variables in the durability of sprayed mixtures under ESA. Based on these results, some recommendations are proposed to reduce the risk of damages due to ESA and to properly characterize this phenomenon by means of laboratory tests.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT.....	V
TABLA DE CONTENIDO	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XVII
1 CAPÍTULO. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROLOGO.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.	3
2 CAPITULO. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 PREÁMBULO.	7
2.2 MEZCLAS PROYECTADAS.....	7
2.3 HISTORIA BREVE DE LAS MEZCLAS CEMENTÍCEAS PROYECTADAS.	8
2.4 FORMAS DE PROYECCIÓN.	9
2.4.1 Proyección por Vía Húmeda.	10
2.4.2 Comparación Vías de Proyección.	11
2.5 MATERIALES BASE DE LAS MEZCLAS PROYECTADAS	11
2.5.1 Cemento.....	12
2.5.2 Aditivos acelerantes.....	12
2.6 DURABILIDAD.	15
2.6.1 Exposición a ataques químicos del mortero proyectado.	15
2.6.2 Ataque sulfático (AS).....	16
2.7 FACTORES QUE INFLUENCIAN EL AS EN EL MEZCLAS PROYECTADAS.	21
2.7.1 Composición del cemento.	22
2.7.2 Permeabilidad y relación Agua- cemento.	22
2.7.3 Utilización de aditivos y adiciones.	23
2.7.4 Medio agresivo.....	23
2.8 EXPERIMENTOS SOBRE AS EN MEZCLA CEMENTÍCEAS.	24
2.8.1 Investigaciones de AS en mezclas convencionales.....	26
2.8.2 Investigaciones de AS en mezclas proyectadas.....	27
3 CAPITULO. PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.1 PREÁMBULO.	29
3.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL.	29
3.3 METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE PROBETAS.	32

3.3.1	<i>Descripción de materiales para proyección por vía húmeda.</i>	32
3.3.2	<i>Dosificaciones de referencia para proyección.</i>	34
3.3.3	<i>Fabricación de mezclas cementíceas.</i>	34
3.3.4	<i>Cámara climática para proyecciones.</i>	35
3.3.5	<i>Artesas y su posicionamiento para proyección.</i>	36
3.3.6	<i>Equipos de proyección y su organización.</i>	36
3.3.7	<i>Ejecución de proyección por vía húmeda.</i>	38
3.3.8	<i>Almacenamiento de muestras luego de proyección.</i>	38
3.3.9	<i>Preparación, corte y extracción de probetas testigos.</i>	39
3.4	EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS BÁSICAS Y MECÁNICAS.	41
3.4.1	<i>Ensayo de porosidad.</i>	41
3.4.2	<i>Ensayo de resistencia a compresión.</i>	41
3.5	EXPOSICIÓN DE MUESTRAS AL ASE ACELERADO Y LOGÍSTICA DE CONTROL.	43
3.5.1	<i>Materiales.</i>	43
3.5.2	<i>Inmersión de muestras en soluciones.</i>	44
3.5.3	<i>Ensayo de control por pH.</i>	45
3.6	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS FRENTE AL ASE.	45
3.6.1	<i>Inspección visual.</i>	46
3.6.2	<i>Ensayo de estabilidad dimensional o expansión lineal.</i>	46
3.6.3	<i>Ensayo de ultrasonidos o velocidad de pulso ultrasónico.</i>	47
3.6.4	<i>Difracción de rayos-X (DRX).</i>	49
4	CAPITULO. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
4.1	PREÁMBULO.	51
4.2	POROSIDAD.	51
4.3	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.	53
4.4	INSPECCIÓN VISUAL.	54
4.5	EXPANSIÓN LINEAL.	58
4.5.1	<i>Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición.</i>	58
4.5.2	<i>Influencia de la edad de exposición.</i>	59
4.5.3	<i>Influencia del tipo de cemento.</i>	60
4.5.4	<i>Influencia del tipo de acelerante.</i>	61
4.5.5	<i>Influencia de la dosis de acelerante.</i>	62
4.5.6	<i>Expansiones máximas alcanzadas.</i>	62
4.6	VELOCIDAD DE ONDA DE ULTRASONIDOS.	63
4.6.1	<i>Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición.</i>	64
4.6.2	<i>Influencia de la edad de exposición.</i>	64
4.6.3	<i>Influencia del tipo de cemento.</i>	66
4.6.4	<i>Influencia del tipo de acelerante.</i>	66
4.6.5	<i>Influencia de la dosis de acelerante.</i>	67
4.7	DIFRACCIÓN DE RAYOS-X (DRX).	68
4.7.1	<i>Porcentaje de etringita.</i>	68
4.7.2	<i>Porcentaje de yeso.</i>	70
4.7.3	<i>Porcentaje de portlandita.</i>	71
4.7.4	<i>Porcentaje de fase AFm.</i>	71
5	CAPITULO. CONCLUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	73
5.1	CONCLUSIONES GENERALES.	73

5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	73
5.2.1 <i>Investigación literaria sobre mezclas proyectadas, su fabricación, formas de aplicación y su comportamiento frente a ataques por sulfatos.</i>	74
5.2.2 <i>Proceso de producción de muestras de mezclas proyectadas.</i>	74
5.2.3 <i>Seguimiento del comportamiento físico y químico del mortero proyectado expuesto al ASE acelerado.....</i>	74
5.2.4 <i>Influencia de la edad de exposición en el avance de la reacción sulfática.....</i>	74
5.2.5 <i>Desempeño de mezclas proyectadas sometidas al ASE acelerado en función del tipo de cemento empleado.</i>	75
5.2.6 <i>Mezclas proyectadas con acelerantes ricos en álcalis, libres de álcalis y mezclas convencionales sin acelerantes bajo un ASE acelerado.</i>	75
5.2.7 <i>Comportamiento de mezclas con distintas dosificaciones de acelerantes libres de álcalis bajo ASE acelerado.....</i>	76
5.3 RECOMENDACIONES.....	76
5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEJOS.....	I
PREÁMBULO.	I
ANEJO A1. PROYECCIÓN VÍA SECA.	I
ANEJO A2. PROYECCIÓN VÍA SECA SEMI-HÚMEDA.	II
ANEJO A3. CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO SEGÚN SU VELOCIDAD ULTRASÓNICA.	III
ANEJO A4. PRINCIPIOS BÁSICOS DRX.....	III
ANEJO A5. CRITERIO DE CHAUVENET.....	III
ANEJO A6. EXPANSIONES MÁXIMAS PERMITIDAS SEGÚN ASTM C1012.	IV
ANEJO B1. CARACTERÍSTICAS DE CEM I 52.5 R.	IV
ANEJO B2. CARACTERÍSTICAS DE CEM II A-L 42.5 R.	V
ANEJO B3. SÚPER PEGAMENTO X60.	V
ANEJO B4. INDICADOR DIGITAL MITUTOYO ABSOLUTE MODELO ID-C.....	VI
ANEJO B5. EQUIPO DE ULTRASONIDO PUNDIT PL-200, CALIBRACIÓN Y CONTROLES.	VI
ANEJO B6. PAUTAS PARA SELECCIÓN DEL TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS.	VII
ANEJO B7. COLOCACIÓN DE MATERIAL EN PORTA MUESTRAS DEL DRX.	VIII
ANEJO B8. CALIBRADO DEL EQUIPO CRISON PH METER BASIC 20+.....	IX
ANEJO B9. MEDIDAS DE PH CON PH-METER BASIC 20+.	X
ANEJO C1. INTERACCIÓN ENTRE LAS DIFERENCIAS DE EXPANSIÓN.	XIII
ANEJO C2 RESULTADOS DE ULTRASONIDOS.....	XV
ANEJO C3. VELOCIDADES ULTRASÓNICAS OBTENIDAS.	XVII
ANEJO C4. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.	XVII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología y estructura de estudio.....	4
Figura 2.1 Inventor y primera máquina de mezclas proyectas. (Teichert, 2002)	8
Figura 2.2 Cronología de la historia de las mezclas proyectas (ASA, 2012)	9
Figura 2.3 Esquema de Proyección Vía Húmeda (Wet-Mix)(ACHE, 2002)	10
Figura 2.4 Representación ternaria de la DEF relacionada con ASI (Collepari, 2003)	18
Figura 2.5 Representación ternaria de la DEF relacionada con ASE (Collepari, 2003)	18
Figura 2.6 Diagrama esquemático de las reacciones químicas debido a la entrada de sulfato (Sarkar et al., 2010)	19
Figura 2.7 Desarrollo del mecanismo de tensiones y agrietamiento (Sarkar et al., 2010)	21
Figura 3.1 Etapas de Campaña Experimental.....	30
Figura 3.2 Variables de análisis comparativo del experimento	30
Figura 3.3 esquema de metodología de estudio de ASE acelerado.....	31
Figura 3.4 Variables de Proyección	32
Figura 3.5 Equipo de mezclado Collomatic 65/2 K-3 (Collomix, 2010).	35
Figura 3.6 Cámara climática para proyección	35
Figura 3.7 Dimensiones de artesa	36
Figura 3.8 Colocación de artesas para proyectado	36
Figura 3.9 Esquema de conexión de equipo de proyección	37
Figura 3.10 Organización y armado de equipo de proyección.....	37
Figura 3.11 Pistola de proyección; a) Desarmada y con boquilla de pastas b) Armada y con boquilla de morteros	38
Figura 3.12 a) Flujo de volumen de acelerantes b) Acción de proyectado.....	38
Figura 3.13 Sistema de temperatura y humedad	39
Figura 3.14 Esquema de diseño de Probetas Testigo	39
Figura 3.15 a) Cortadora de disco radial (J. Galobardes Reyes, 2011). b) Probetas testigo.	40
Figura 3.16 Taladro Hilti DD200	41
Figura 3.17 Iberetest modelo MEH-300 (W. UPC, 2015)	42
Figura 3.18 a) Esquema de Extracción de Testigos b) Testigos de 25x50 mm.....	42
Figura 3.19 Ensayo de compresión: a) Control de equipo b) Colocación de testigo c) Rotura de testigo	43
Figura 3.20 Diseño de base para probetas.....	44
Figura 3.21 Probetas de mortero inmersas en sulfatos	45
Figura 3.22 pH-metro CRISON (CRISON, 2008)	45
Figura 3.23 Inspección visual de espécimen	46
Figura 3.24 Reloj Comparador, extensómetro, micrómetro o indicador de tensión mecánica DEMEC	46
Figura 3.25 Accesorios de medición DEMEC (Mayers Group, 2009)	47
Figura 3.26 Proceso de Medición de Expansiones con el DEMEC	47
Figura 3.27 Equipo de ensayos ultrasónicos Pundit PL-200 (Proceq SA, 2014)	48
Figura 3.28 Diagrama de transmisión directa	48
Figura 3.29 Proceso de obtención de tiempo de transmisión de onda ultrasónica	49
Figura 3.30 Diagrama de flujo de preparación de muestra para DRX	50

Figura 4.1 Pictograma de porosidad	52
Figura 4.2 Resistencia a compresión.....	53
Figura 4.3 Testigos sumergidos en agua	54
Figura 4.4 Espécimen con cristalización salina	55
Figura 4.5 Inicio y desarrollo del deterioro en los bordes (CIAF1).....	56
Figura 4.6 Desarrollo de deterioro hasta el pun de falla de muestras (CIAR2_3%_28D) frente a ASE.	56
Figura 4.7 Deterioro de familia CIAR2_3%_7D	57
Figura 4.8 Deterioro de familia CIAR2_3%_28D	57
Figura 4.9 Influencia del proceso de producción: a) CEM I b) CEM II	58
Figura 4.10 Influencia de la edad de exposición CEM I: a) 7 días antes de exposición b) 28 días antes de exposición	59
Figura 4.11 Influencia de la edad de exposición CEM II: a) 7 días antes de exposición b) 28 días antes de exposición	60
Figura 4.12 Influencia del tipo de cemento: a) CEM I 52.5 R b) CEM II A-L 42.5 R	60
Figura 4.13 Influencia del tipo de acelerante (CEM I): a) AF b) AR	61
Figura 4.14 Influencia del tipo de acelerante (CEM II): a) AF b) AR	61
Figura 4.15 Influencia de la dosis de acelerante: a) 5 % b) 7 %	62
Figura 4.16 Expansiones lineales máximas alcanzadas en 161 días de exposición.	63
Figura 4.17 Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición: a) en agua b) en Na ₂ SO ₄	64
Figura 4.18 Influencia de edad de exposición (CEM I): a) 7 días b) 28 días	65
Figura 4.19 Influencia de edad de exposición (CEM II): a) 7 días b) 28 días	65
Figura 4.20 Influencia del tipo de cemento: a) CEM I b) CEM II	66
Figura 4.21 Influencia del tipo de acelerante (CEM I): a) AF b) AR	66
Figura 4.22 Velocidad Ultrasónica de muestras CEM II inmersas en Na ₂ SO ₄ con acelerante: a) AF b) AR	67
Figura 4.23 Influencia de la dosis de acelerante: a) 5 % b) 7 %	67
Figura 4.24 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de Etringita: a) en H ₂ O b) en Na ₂ SO ₄	69
Figura 4.25 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de yeso: a) Inmersa en H ₂ O b) Inmersa en Na ₂ SO ₄	70
Figura 4.26 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de Portlandita: a) Inmersa en H ₂ O b) Inmersa en Na ₂ SO ₄	71
Figura 4.27 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de AFm: a) Inmersa en H ₂ O b) Inmersa en Na ₂ SO ₄	72
 Anejo Figura I Esquema de Proyección Vía Seca (Dry-Mix) (ACHE, 2002)	i
Anejo Figura II Esquema de Proyección Vía Semi-Húmeda (Rey, 2006)	ii
Anejo Figura III Expansiones máximas a 18 meses	iv
Anejo Figura IV Pegamento para medidores de deformación X60 (HBM, 2007)	v
Anejo Figura V Indicador Digital Mitutoyo Absolute modelo ID-C (Mitutoyo, 2015)	vi
Anejo Figura VI Alineación sobre cilindro de calibración (Proceq SA, 2014)	vii
Anejo Figura VII a) Balanza analítica y patrón de TiO ₂ rutilo b) Mortero de ágata y muestra homogénea con patrón	viii
Anejo Figura VIII a) colocación de material en porta muestra b) Muestras listas para ensayo	viii
Anejo Figura IX Electrodo (CRISON, 2008)	ix
Anejo Figura X Tampones de pH (CRISON, 2008)	ix

Anejo Figura XI Esquema de calibración (CRISON, 2008)	xi
Anejo Figura XII Diagrama de medida de pH	xii
Anejo Figura XIII Interacción entre todas las expansiones	xiii
Anejo Figura XIV Interacción sin las expansiones de AR2.....	xiv
Anejo Figura XV Velocidad de onda ultrasónica en agua	xv
Anejo Figura XVI Velocidad de onda ultrasónica en sulfato de sodio	xvi

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación entre vías de Proyección Seca y Húmeda ACI 506R-90 y (Gedeon, 2005).....	11
Tabla 2.2 Tipos de acelerantes y sus propiedades (Schlumpf et al., 2011)	13
Tabla 2.3 Incrementos de volumen asociados al AS (Clifton & Pommersheim, 1994; Sarkar et al., 2010; Wang, 1994).....	20
Tabla 2.4 Solubilidad y concentración de sales sulfáticas en agua a 20° C (Eglinton, 1998).....	23
Tabla 2.5 Investigaciones referentes al AS en mezclas cementíceas.....	25
Tabla 3.1 Ensayos de campaña experimental.....	31
Tabla 3.2 Composición química de cementos	32
Tabla 3.3 Curva granulométrica arena caliza 0-1mm	33
Tabla 3.4 Características del súper-plastificante SikaPlast T-1120 (SIKA, 2011).....	33
Tabla 3.5 Dosificación de acelerantes.....	34
Tabla 3.6 Dosificación relativa de mezclas.....	34
Tabla 3.7 Desarrollo logístico de obtención de probetas	40
Tabla 3.8 Características del Sulfato de Sodio (SIGMA-ALDRICH, 2015a, 2015b)	44
Tabla 3.9 Parámetros de DRX	50
Tabla 4.1 Periodo inicial, área y tipo de deterioro testigos en sulfatos.....	55
Anejo Tabla I Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Solís Carcaño et al., 2004) ..	iii
Anejo Tabla II Características de CEM I 52.5 R (CEMOLINS, 2009a)	iv
Anejo Tabla III Características de CEM II A-L 42.5 R (CEMOLINS, 2009b)	v
Anejo Tabla IV Características de selección del transductor	vii
Anejo Tabla V Parámetros del Equipo (CRISON, 2008).....	x
Anejo Tabla VI Variables medidas (CRISON, 2008)	x
Anejo Tabla VII Velocidades ultrasónicas obtenidas en día cero.....	xvii
Anejo Tabla VIII Resistencia a Compresión	xvii

ÍNDICE DE ECUACIONES

EC.2.1.....	16
EC.2.2.....	17
EC.2.3.....	17
EC.2.4.....	17
EC.2.5.....	20
EC.2.6.....	20
EC.2.7.....	20
EC.2.8.....	20
EC.2.9.....	20
EC.2.10.....	20
EC.2.11.....	20
EC. 3.1.....	49

1 CAPÍTULO. INTRODUCCIÓN

1.1 PROLOGO.

Actualmente, se estima que un tercio de la inversión anual en el campo de la construcción, se dedica al mantenimiento, convirtiendo la durabilidad del hormigón en un aspecto clave en la industria de la construcción (Ikumi Montserrat, 2013). Normas e instrucciones como las UNE, EHE, ACI, ASTM priorizan la durabilidad como factor fundamental del diseño de estructuras. Para el diseño basado en la durabilidad se deben considerar aspectos como materiales, técnicas utilizadas en el proceso constructivo, intemperismo, posibles ataques químicos y cualquier acción que comprometa la vida útil de la estructura.

Producto de la evolución de las técnicas constructivas nacen las mezclas proyectadas a principio del siglo XIX. En su origen su función era estética utilizándose con fines arquitectónicos. En la actualidad se utiliza en muchas aplicaciones constructivas con responsabilidad estructural y posiblemente sean incorporadas como material estructural en la nueva versión del código estructural en España. Desde su utilización como técnica constructiva ha mantenido un incesante perfeccionamiento tecnológico en materiales, equipos, aplicación y control de calidad. En América y Europa se han obtenido grandes avances en referencia a caracterizar la resistencia a compresión y flexión de estas mezclas. Estas propiedades físico-mecánicas eran utilizadas para determinar la durabilidad de la mezcla, pero la investigación y las obras en campo real han revelado que estas características son necesarias más no suficientes para la obtención de una mezcla cementícea durable.

Entre los usos principales de las mezclas proyectadas esta la estabilización de taludes y muros de contención, refuerzos estructurales de muros, la protección contra incendios en estructuras metálicas, pero su aplicación más sistemática es el sostenimiento y reparación de túneles, en los sectores minero, hidroeléctrico y transporte subterráneo. En estos ambientes se encuentra en contacto con el suelo o aguas subterráneas que pueden transportar elementos o compuestos químicos que interactúan de manera nociva con las mezclas proyectadas. Estos agentes nocivos podrían comprometer la durabilidad de las propiedades del material de las estructuras. Entre los principales agentes nocivos están los sulfatos, los cuales pueden dar lugar a las reacciones químicas que producen expansión y fisuración comprometiendo las propiedades mecánicas del material. Estos han sido motivo de preocupación para los tecnólogos de mezclas cementíceas desde principios del siglo XIX (Al-amoudi, 2002).

El ataque por sulfatos (AS) es una forma compleja de deterioro que afecta la durabilidad de estructuras de mezcla cementíceas en todo el mundo. Es particularmente compleja porque la fuente de sulfatos puede ser externa o interna. En ambos casos el principal producto de la reacción química que da lugar a las degradaciones apreciadas es la formación de etringita secundaria. Asimismo, su actividad puede ser:

- De naturaleza química, debido a la alteración que produce en las fases hidratadas del cemento portland;
- De naturaleza física, debido a la formación de compuestos expansivos que al no encontrar suficiente espacio para acomodarse producen tensiones internas dando lugar a la formación de fisuras. Estas fisuras a su vez afectan las propiedades mecánicas del material y su vida útil.

En la literatura existe una extensa diversidad de estudios centrados en la evaluación de la reacción sulfática externa. Prácticamente la totalidad de sus estudios se centran en la caracterización del comportamiento de mezclas cementíceas producidas de forma manual o mecánica. Identificándose la falta significativa de investigaciones que traten la repercusión del AS en mezclas proyectadas. Las diferencias entre las mezclas convencionales y mezclas proyectadas son producidas por la técnica de proyección, donde la integración de aire a presión para lanzar la mezcla a gran velocidad tiene el efecto colateral de incrementar su porosidad. Producto de este aumento de porosidad la mezcla proyectada presenta una microestructura distinta, donde la calidad de la interfaz entre el árido y la mezcla es menor.

Es alarmante el hecho de que un material con una microestructura tan diferente a las mezclas convencionales, por su proceso de producción y que frecuentemente está sometido a medios con alto riesgo de presencia de sulfatos sea tan escasamente estudiado en la literatura. Esto supone un riesgo en la aplicación estructural de las mezclas proyectadas, porque la repercusión del ataque puede suceder de manera distinta que en las mezclas convencionales. Por lo tanto, es necesario para que se utilice de manera eficiente y segura las mezclas proyectadas como material estructural la realización de más estudios sobre su comportamiento frente al ataque por sulfatos externos (ASE).

1.2 OBJETIVO GENERAL.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, el objetivo principal de esta investigación es evaluar la durabilidad del mortero proyectado de forma húmeda, cuando se encuentran continuamente expuestos a ambientes con altas concentraciones de sulfatos. Con el logro de este objetivo se pretende ampliar y mejorar el conocimiento científico y constructivo de este material cuando es sometido a ASE.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para asegurar el éxito del objetivo principal de esta evaluación, se plantea el desarrollo de los siguientes objetivos específicos;

- Investigar la literatura sobre mezclas proyectadas, su fabricación, formas de aplicación y su comportamiento frente a ataques por sulfatos.
- Supervisar todo el proceso de producción de muestras de mezclas proyectadas.

- Evaluar de forma continua el comportamiento físico y químico del mortero proyectado expuesto a altas concentraciones de sulfatos.
- Estudiar la influencia de la edad de exposición en el avance de la reacción sulfática.
- Analizar el desempeño de mezclas proyectadas sometidas al ASE acelerado en función del tipo de cemento empleado.
- Comparar el mortero proyectado con acelerantes ricos en álcalis, libres de álcalis y mezclas convencionales sin acelerantes bajo un ASE acelerado.
- Evaluar si las mezclas cementíceas proyectadas con distintas dosificaciones de acelerantes libres de álcalis presentan igual desarrollo en un ambiente sulfático.

1.4 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

El hecho de que prácticamente no existe estudio de mezclas proyectadas, las cuales poseen una microestructura tan distinta a las mezclas convencional contrasta con la realidad del uso del material que esta frecuentemente sometido a medios con alto riesgo de presencia de sulfatos. En esta tesis de máster se pretende evaluar el ataque de sulfatos externos (ASE) acelerado en mezclas proyectadas, específicamente los morteros proyectados.

La diferencia entre las mezclas cementíceas, denominadas hormigón y mortero es el tamaño máximo del árido, pues para el mortero no debe exceder los 8 mm, mientras que para el hormigón debe ser superior a 8 mm (Rey, 2006; Seabrook et al., 1995). España las dimensiones granulométrías de diferencia entre ambos materiales son en referencia a 4 mm. Se opta por la utilización del mortero proyectado por encima del hormigón proyectado en función de las razones siguientes;

- Provee una gran facilidad para la producción y ejecución de mezclas proyectadas al igual que la realización de ensayos analíticos, pues al tener menor dimensión de agregado las dimensiones de las probetas a ensayar son menores y se utilizan equipos más pequeños.
- La mayoría de los estudios sobre AS existentes en la literatura se realizan en morteros o pastas, por lo que estos pueden servir como referencia comparativa. Por ende, genera un elemento de referencia comparativa más amplia.
- Los aspectos fundamentales relacionados con la interacción entre acelerante y cemento se presenta de manera similar en ambos (Isaac Galobardes Reyes, 2013).

Con la intención de lograr los objetivos propuestos, se ejecutan distintos análisis, los cuales corresponden a los diferentes capítulos de este estudio. En la figura 1.1, se esquematiza el proceso organizativo propuesto para la realización de esta investigación. La tesis se divide en 5 capítulos más los anejos, en estos se manifiesta el desarrollo de todo el proceso investigativo y experimental.

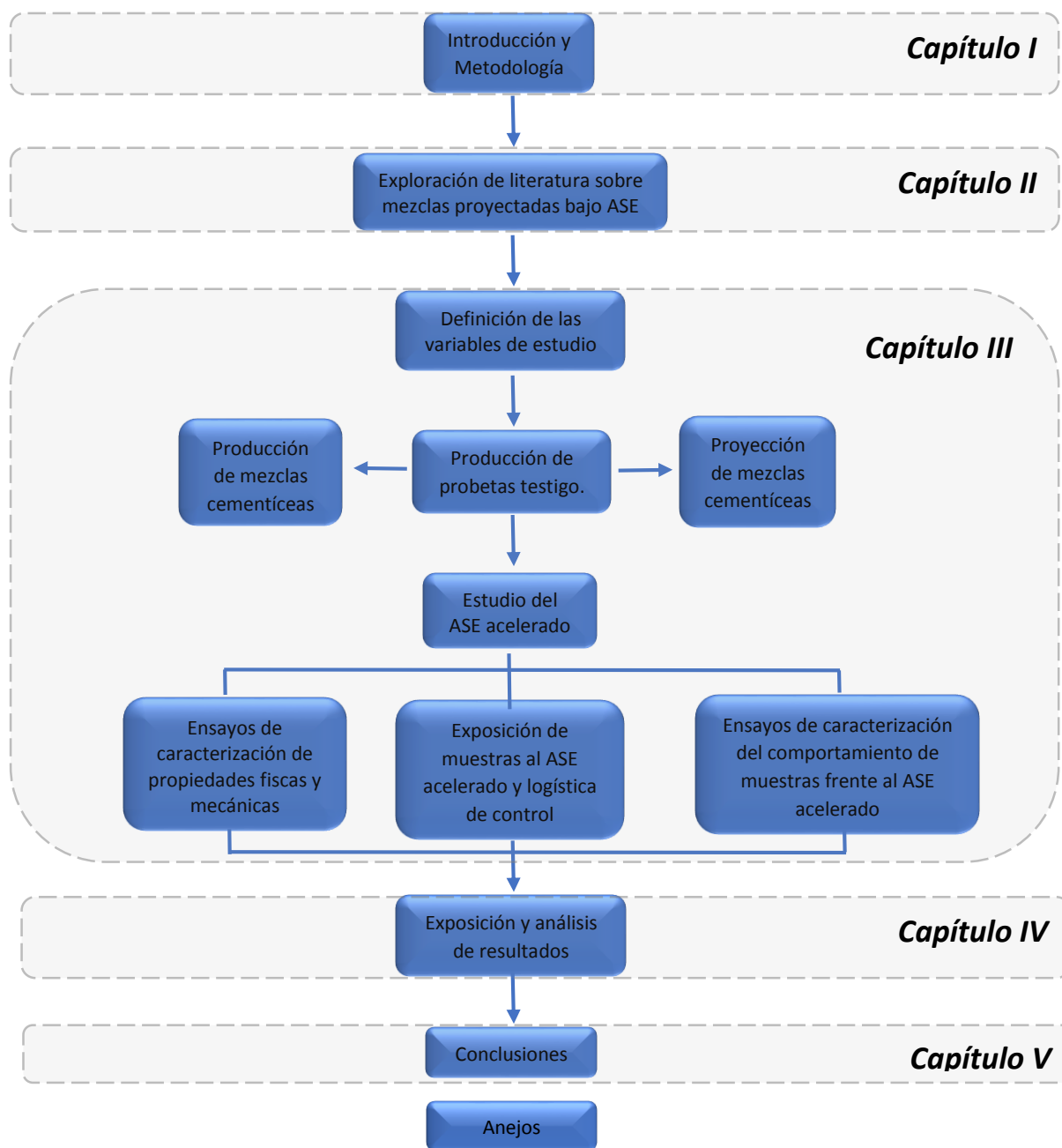


Figura 1.1 Metodología y estructura de estudio.

En la introducción o primer capítulo se presenta formalmente esta investigación, donde se inicia con la situación general del campo de la construcción, la presentación de las mezclas proyectadas producto de la evolución de las técnicas constructivas, principales áreas de uso e introducción de la problemática del estudio. Luego se hace la exposición de los objetivos, finalizando con la presentación de la metodología o estructura para alcanzarlos.

En el estado del arte o segundo capítulo se realiza una breve revisión histórica de las mezclas proyectadas, los materiales involucrados en su diseño y sus técnicas de aplicación. Seguido de los requerimientos de durabilidad, se explican los distintos tipos de AS, su mecanismo de deterioro, los factores que influyen en este ataque químico y diversos estudios realizados sobre este ataque químico.

El programa experimental o tercer capítulo está dividido en dos grandes bloques: El primero es la metodología para la obtención de las muestras y el segundo es la metodología de evaluación y seguimiento de las muestras bajo ASE acelerado. El primer bloque está conformado por el proceso de proyección de mezclas (materiales, dosificación, equipos y logística de proyección), el almacenamiento posterior a la proyección y el posterior diseño de las probetas testigo (extracción, corte y preparación). El segundo bloque se divide en tres grandes etapas: la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras, la exposición de los testigos al ASE acelerado y el seguimiento y evaluación del comportamiento de las muestras expuestas.

En el cuarto capítulo se realiza la exposición y el análisis de los resultados obtenidos a lo largo de todo el programa experimental. Donde se presentan los resultados en función de las diferentes variables presentadas, obtenidos como el producto de las diferentes técnicas utilizadas.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones derivadas del programa experimental y exhibidas en la exposición y análisis de resultados. Posterior a esto se proponen futuras líneas de investigación respecto al tema.

Luego del desarrollo literal de la investigación se adjunta un apartado de referencias bibliográficas donde se exponen las diversas fuentes consultadas y citadas para mejorar la comprensión del tema. Seguido se presenta la sección de anejos, utilizado como apartado de recopilación de datos que son importantes de forma alterna en el desarrollo de la tesis.

2 CAPITULO. ESTADO DEL ARTE

2.1 PREÁMBULO.

Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura (EHE-08, 2008). En este capítulo se plasma información sobre las mezclas proyectadas, los materiales que lo integran y las diferentes formas en la que es aplicado. Se conoce que la proyección de materiales cementicios es un método de colocar mortero u hormigón. Los materiales que se derivan en un mortero u hormigón de alta calidad deben ser igual de adecuadas para dicho resultado. Se detalla el uso de aditivos en la mezcla pues los acelerantes son el aditivo específico de las mezclas proyectadas. Estos aditivos son indispensables en algunas sus aplicaciones, como túneles donde se necesita un rápido desarrollo de la resistencia (Seabrook et al., 1995).

Se focaliza la durabilidad del mortero proyectado o gunita y las formas en las que puede ser afectado. En esta nota se especifica el ataque químico y derivado de este la acción de un ataque por sulfatos (AS). Producto de este enfoque se describe bajo la influencia de diferentes autores que es el AS. En este tono se resaltan diferentes mecanismos de deterioro ofrecidos por este ataque químico, así como los factores que influyen su acción negativa en las mezclas proyectadas como podría ser el ambiente en que se encuentra la estructura.

2.2 MEZCLAS PROYECTADAS.

Según el ACI 506R el hormigón proyectado (Shotcrete) es una mezcla cementícea proyectada neumáticamente sobre una superficie a alta velocidad (Seabrook et al., 1995). El hormigón proyectado es un hormigón cuyo tamaño máximo de áridos es superior a 8 mm, y que, aplicado con máquina, se proyecta a gran velocidad sobre un soporte a través de manguera y boquilla. Mientras que el mortero proyectado (gunitado) es un mortero cuyo tamaño máximo de áridos no excederá 8 mm y cuya aplicación posee el mismo procedimiento que el hormigón proyectado (Rey, 2006). En España este tamaño de árido diferenciador es de 4 mm.

Las propiedades físicas un buen mortero proyectado son comparables o superiores a las de mortero convencional. Sus aplicaciones se pueden clasificar en tres categorías (Seabrook et al., 1995):

- a) Convencional, usando cemento portland, agregados y aditivos comunes;
- b) Refractivos, usando aglomerantes de alta temperatura y agregados refractarios;
- c) Especiales, usando combinaciones de propiedades de aglutinantes y agregados, o hormigón proyectado convencional con aditivos especiales.

Estas modalidades son utilizadas en diferentes tipos de estructuras ya sea una proyección convencional, nuevas estructuras, forrados o revestimientos, reparaciones o fortalecimiento y refuerzo de estructuras.

2.3 HISTORIA BREVE DE LAS MEZCLAS CEMENTÍCEAS PROYECTADAS.

Las mezclas cementíceas proyectadas realizan su aparición a principios del siglo XX como una forma de imitar la forma de las rocas (Isaac Galobardes Reyes, 2013). El desarrollo de la primera pistola de cemento supuestamente inicio en 1985 (pero en realidad inicio 12 años antes) (Teichert, 2002). La invención del “mezclas proyectadas a alta velocidad sobre una superficie” con el método de mezcla seca es acreditado al conocido naturalista y taxidermista Dr. Carl E. Akeley en el 1907 [Fig. 2.1]. La máquina (y proceso de aplicación) [Fig. 2.1] fue introducida en el “Cemento Show”, en el Madison Square Garden, N.Y., en diciembre del 1910 (Yoggy, 2002). Mientras las patentes del equipo y el método de aplicación fueron concedidas en 1911 (ASA, 2012).

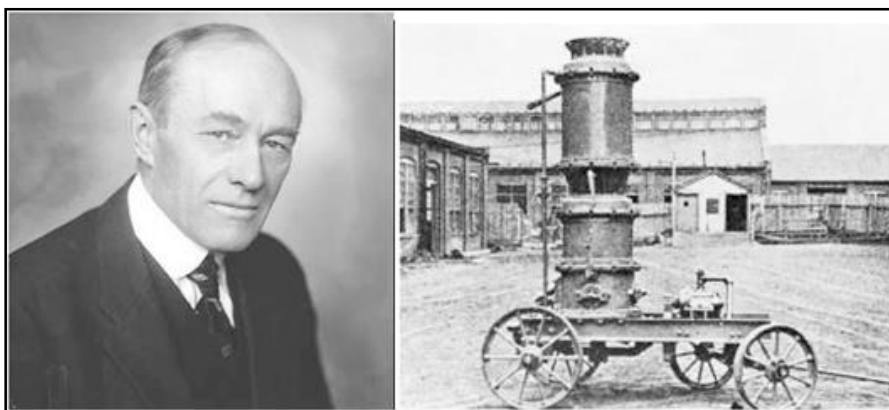


Figura 2.1 Inventor y primera máquina de mezclas proyectas. (Teichert, 2002)

Varias compañías relacionadas a la “gunita” se formaron en todo el mundo lo que le permitió un crecimiento rápido del gunitado desde 1912 a 1930 (ASA, 2012). Para el año 1950, alrededor de 500 máquinas habían sido entregadas a proyectos y contratadores en más de 120 países (Yoggy, 2002). En la Figura 2.2 se aprecia de forma cronológica algunos de los sucesos que contribuyen a que se continúen investigando nuevas formas de uso de las mezclas proyectadas.

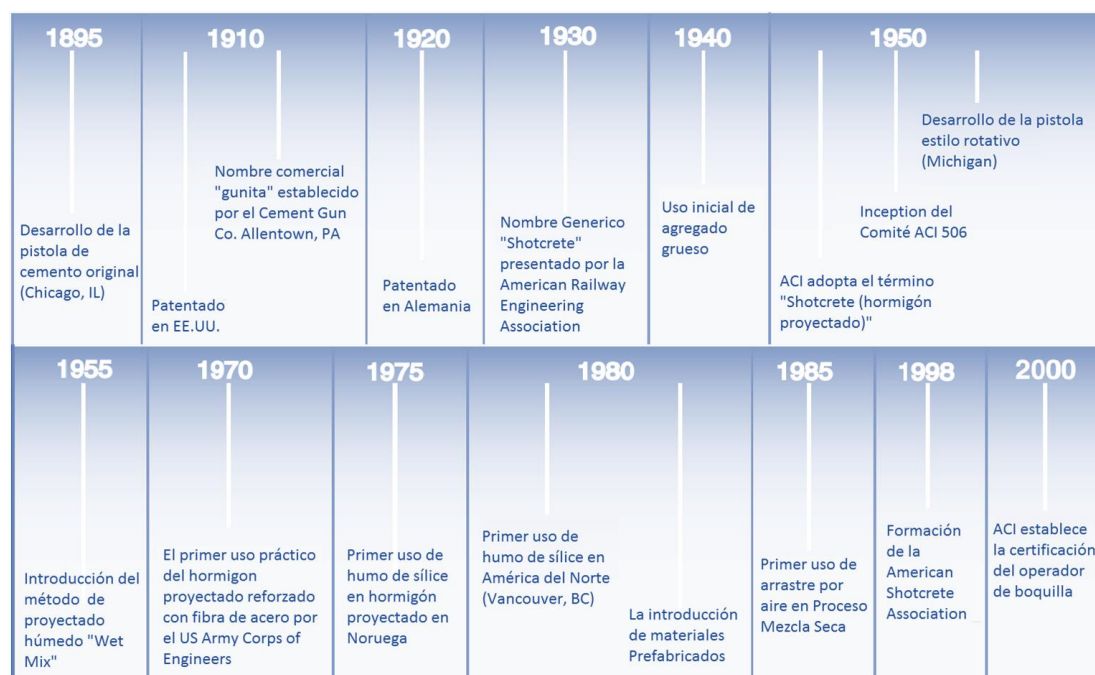


Figura 2.2 Cronología de la historia de las mezclas proyectadas (ASA, 2012)

El termino genérico "Hormigón Proyectado o Shotcrete" fue introducido por la American Railway Engineering Association en el 1930 [Fig. 2.2], el cual es adoptado por la ACI entre el 1940 – 1950. En los 50 se desarrolla la pistola rotatoria (Michigan) para el método de mezcla seca, lo cual proporciona dos ventajas sobre el método que dominaba el mercado por más de medio siglo: Una producción mucho más elevada; y mezclas con grandes agregados podían ser realizadas como las normas lo especificaban. El método de mezcla húmeda es introducido en el 1955, a raíz de esto se forma una confusión pues algunos usaban el término "Shotcrete" para describir mezclas con agregados grandes (5/6 pulgadas o 16 mm) en vez del termino gunita, lo cual era considerado únicamente como arena y cemento. Esta confusión continuó hasta que la ACI definió el concreto aplicado de forma neumática como "hormigón proyectado (Shotcrete) incluyendo los métodos de mezcla seca y húmeda". De aquí en adelante se han hecho innumerables investigaciones y avances como el esquema presenta.

2.4 FORMAS DE PROYECCIÓN.

Se conocen dos formas populares de aplicación de hormigón, la proyección por vía Seca [Anejo A1] y la proyección por vía húmeda. Ambas vías se diferencian por el lugar o momento en que se produce la mezcla. En la vía seca la mezcla se produce en la boquilla de proyección (proyector), en la vía húmeda se produce antes de entrar a la manguera de transporte (Pacheco Ortega, 2012). Sin embargo otro proceso no tan reconocido es el sistema de mezcla semi-húmeda [Anejo A2], el cual consiste en dosificar el agua, aproximadamente 5 m antes de la boquilla, es un proceso que evita fundamentalmente que la mezcla seca se disperse (especialmente el cemento) en el momento de realiza la proyección (Rey, 2006) .

Cuando se confecciona un proyecto en el cual se especifica una resistencia a compresión simple de una mezcla proyectadas, se suelen definir las Resistencias a 24 horas, 7 días, y 28 días, para cumplir las necesidades de sostenimiento. Estas resistencias dependen de: áridos, cementos, personal especialista, maquinaria, medios auxiliares, aditivos (acelerantes, estabilizadores, súper-plastificantes, etc.) y adiciones (Rey, 2006).

2.4.1 Proyección por Vía Húmeda.

Las máquinas de mezcla húmeda producen mortero proyectado, por dos procedimientos fundamentales en Flujo diluido y Flujo denso, (Rotor y Bomba), con grandes rendimientos, cubriendo de este modo sobradamente las aplicaciones de las máquinas de mezcla seca (Rey, 2006). Estas máquinas se limitan a un bombeo a alta velocidad a través de conductos rígidos y flexibles hasta una boquilla, provista de un chorro de aire comprimido, con lo que se obtiene un mortero u hormigón de compactación relativa. Pero gracias a los recientes progresos, tanto de nuevas máquinas como de aditivos estabilizadores, han conducido esta tecnología a un sistema perfectamente compatible con el fin deseado y con una ventaja importante: La no-formación de polvo y el mantenimiento de la relación Agua/Cemento (Rey, 2006).

De forma definida la ACI 506R-90 detalla los pasos específicos para la realizar la proyección húmeda como se puede observar a continuación:

- Todos los ingredientes, incluyendo el agua de mezclado, pero por lo general con exclusión del acelerador, se mezclan a fondo.
- La mezcla se introduce en la cámara de los equipos de entrega.
- La mezcla se dosifica en la manguera de entrega y movido por un equipo para desplazamiento o transportado por aire comprimido hasta la boquilla.
- El Acelerante se suele añadir en la boquilla.
- Se inyecta aire adicional en la boquilla para aumentar la velocidad y mejorar el patrón de disparo.
- La mezcla se inyecta desde la boquilla a alta velocidad en la superficie proyectada [Fig. 2.3].

Como ratifica el autor (Pacheco Ortega, 2012) en conjunto con la norma ACI-506 en la vía de proyección húmeda, los componentes cementicios, los áridos y los aditivos plastificantes requeridos se mezclan con el agua de amasado antes de introducirlos a la tolva de alimentación de la máquina de proyección, la que puede funcionar en base a un sistema rotor (flujo fluido) o de bombeo (flujo denso), siendo éste último el más utilizado en la actualidad [Fig. 2.3].

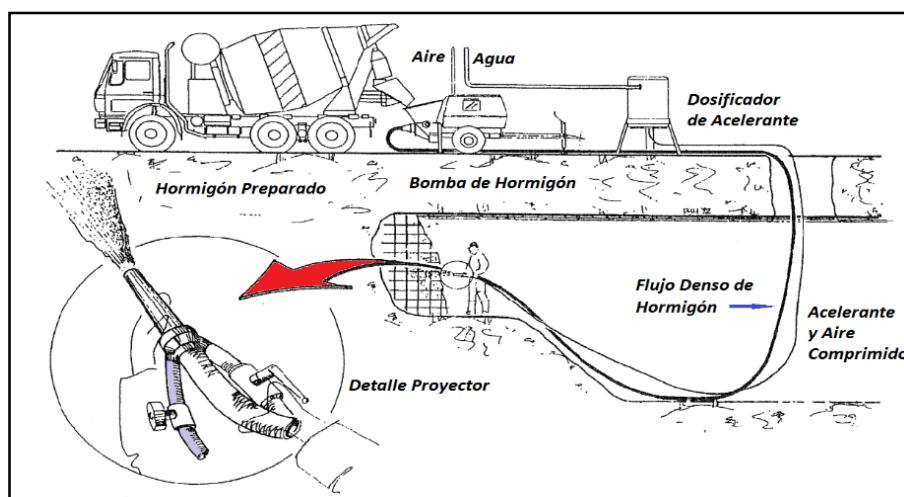


Figura 2.3 Esquema de Proyección Vía Húmeda (Wet-Mix)(ACHE, 2002)

2.4.2 Comparación Vías de Proyección.

De acuerdo con la ACI 506R-90 las mezclas proyectadas adecuadas para los requisitos normales de construcción pueden ser producidas por cualquiera de los procesos. Sin embargo, las diferencias en costo y mantenimiento de equipos, las características operacionales, la idoneidad de agregado disponible, la calidad del producto y las características de colocación pueden hacer una u otra más atractiva para una aplicación particular. Las diferencias en características operativas y otras propiedades que merecen consideración son mostradas en la tabla 2.1.

Proyección por Vía Seca	Proyección por Vía Húmeda
Control instantáneo sobre agua de mezclado y sobre la consistencia de la mezcla en la boquilla (proyector) para satisfacer las condiciones de cada campo.	Agua de mezcla se controla en el equipo de suministro y se puede medir con precisión
Más adecuado para la colocación de mezclas que contienen agregados ligeros, materiales refractarios y hormigón/mortero proyectado que requieren propiedades de resistencia temprana.	Mayor seguridad de que el agua de la mezcla esté bien mezclada con los otros ingredientes
Es capaz de ser transportado largas distancias	Menor polvo y menor pérdida de cemento durante la proyección
De ser necesario se pueden utilizar mangueras más largas	Se necesita una distancia normal de bombeo
Mayor fortaleza de enlace	Menor fortaleza de enlaces, sin embargo, por lo general es mayor al del concreto convencional
La tasa de producción es más baja	Capaz de un mayor volumen de producción
Mayor rebote	Normalmente tiene menor rebote que resulta en menos desperdicio de material
Limitado a aceleradores como el único aditivo práctico.	Es compatible con todos los aditivos ordinarios. Se necesitan dispensadores especiales para agregar acelerantes.
Limitado a aceleradores como el único aditivo práctico.	Es compatible con todos los aditivos ordinarios. Se necesitan dispensadores especiales para agregar acelerantes.
El uso del aditivo incorporador de aire no es beneficioso. La resistencia al hielo y deshielo es pobre.	Se puede realizar el arrastre por aire. Posee una resistencia aceptable al hielo y deshielo.
Es posible un rendimiento excepcional de resistencia	Resistencia más baja, similares al hormigón convencional
El Inicio y detención de las características de colocación son mejores con un mínimo de desperdicio y una mayor flexibilidad de ubicación	Es más adecuado para la aplicación continua de hormigón proyectado.

Tabla 2.1 Comparación entre vías de Proyección Seca y Húmeda ACI 506R-90 y (Gedeon, 2005)

2.5 MATERIALES BASE DE LAS MEZCLAS PROYECTADAS

La calidad de los materiales a utilizar, los áridos y sus granulometrías, el cemento y su dosificación, el lugar, las condiciones de trabajo, y el equipo empleado, influyen en la calidad de la mezcla proyectada. Se deberán realizar ensayos previos, tanto del funcionamiento de los equipos, como de los materiales a emplear (Rey, 2006). La EFNARC (European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete) presenta recomendaciones para mezclas proyectadas y los materiales del producto (cemento, agregados, agua, etc.).

2.5.1 Cemento.

El cemento en la mezcla de mortero proyectado actúa como un "pegamento" que une e integra las partículas de los agregados a través de la matriz del cemento. Este siempre debe comenzar a fraguar de forma extremadamente rápida, dar una buena capacidad de unión y una alta resistencia en edades tempranas. (Schlumpf, Höfler, & Jahn, 2011). El contenido de cemento es generalmente de 300 a 450 kg/m³. Esto depende del proceso de proyección y los requisitos de la mezcla proyectada (Schlumpf et al., 2011).

Los requisitos del cemento a ser utilizados en las mezclas proyectadas son similares a los usados en el hormigón convencional. El cemento portland debe poseer los requisitos de la ASTM C 150 o C595, tipo CEM I categorías 52.5R o 42.5R, o tipo CEM II. En el caso de que las condiciones locales lo aconsejen, se podrán utilizar otros cementos, previamente aprobados y ensayados. Si la gunita va a ser expuesta a la acción de suelos o aguas subterráneas con alta concentración de sulfatos, deberá emplearse cemento sulfo-resistentes tipo II o V (Gedeon, 2005; Rey, 2006). Respecto a las normas europeas debe satisfacer los requisitos de la UNE-EN 197-1:2011 (Cemento - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria from common cements 2011). Finalmente, el cemento también debe cumplir los requisitos de la UNE-EN 206-1:2008 (Concrete - Part 1: Specifications, performance, production and conformity 2008) según la EFNARC.

2.5.2 Aditivos acelerantes.

En el pasado los acelerantes era exclusivamente polvorientos y solo se mezclaban con el mortero proyectado de forma seca. En la actualidad se utilizan acelerantes tanto líquidos como en polvo y se utilizan tanto en mezcla seca como en mezcla húmeda (Gedeon, 2005). Los aditivos y adiciones más empleadas en las mezclas proyectadas por vía húmeda son los acelerantes (líquido o en polvo), los súper-plasticantes, el humo de sílice (polvo o slurry), los estabilizadores de fraguado, los reductores de rebote, las fibras de acero o polipropileno y las cenizas volantes (Rey, 2006). El uso de acelerantes requiere que este sea adherido en la manguera de proyección en vez de ser mezclado con los otros materiales (Gedeon, 2005).

Los aditivos se pueden utilizar en la construcción de mezclas proyectadas para mejorar ciertas propiedades de las mismas y proyectados especiales (Gedeon, 2005). Dos de los aspectos más importantes referentes al proceso de producción de la mezcla son la porosidad y rebote (Austin, 2002; Isaac Galobardes Reyes, 2013; Vandewalle, 2005). La porosidad es alta en el caso de mezclas proyectadas debido al uso de aire comprimido durante su ejecución. Parte del aire se incorpora en la mezcla cuando el concreto es colocado. Esta porosidad adicional afecta las propiedades mecánicas del producto final, por lo que debe ser considerado durante la caracterización del producto. El valor de la porosidad ronda valores del 10 – 14 % y en ocasiones superior (Yubero, 2010). También cuando la mezcla es proyectada a alta velocidad en contra de una superficie, una parte no se adhiere y rebota. Este rebote afecta la composición final de la mezcla proyectada, disminuyendo la cantidad de agregado grueso y en consecuencia las propiedades mecánicas del hormigón (Efnarc, 1999).

Para minimizar ambos problemas y asegurar el bombeo, la composición de la mezcla se debe diseñar como se especifican en las normas como la UNE-EN 934-5:2009 (Efnarc, 1999; Seabrook et al., 1995). Aun cuando se utilizan los mismos materiales constitutivos (agua, cemento y agregados) para conseguir y mejorar la mezcla, se deben agregar aditivos. Los acelerantes son el aditivo específico de las mezclas proyectadas. El efecto del acelerante en el fraguado inicial y en el endurecimiento varía mucho en función de la clase y tipo de cemento, de la cantidad de agua y temperatura de la mezcla

(Rey, 2006). Estos controlan el inicio del fraguado de las mezclas proyectadas luego de ser aplicadas. Se utilizan en forma de polvo o líquido. Un criterio importante para la calidad del fraguado del mortero proyectado es la constancia de la dosificación del acelerante, por lo que al utilizar aceleradores siempre se deben añadir a partir de unidades de medición que garanticen que la cantidad sea uniforme y coincida con la que se proyecta (Schlumpf & Höfler, 2006).

Lo acelerantes son básicos para reducir el rebote del material y para asegurar la unión entre el mortero proyectado y la superficie. Estos actúan en la reacción producida por el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento en edad temprana. Al adherir estos aditivos en la mezcla, la consistencia del mortero cambia de líquido a plástico, mientras está siendo lanzado (en el aire) el concreto fragua rápidamente en la superficie (Austin, 2002; Lootens, Lindlar, & Flatt, 2008; Rey, 2006).

Los acelerantes se clasifican de acuerdo a su composición química por lo tanto su modo de acción y efecto sobre fraguado del hormigón son diferentes (Schlumpf & Höfler, 2006). Los aditivos en las mezclas proyectadas son añadidos como un porcentaje del peso del cemento o aglutinante. Estos son añadidos en un rango de entre el 0.5 % y el 7.0 %. Esto proporciona cantidades entre 2 kg/m³ a 32 kg/m³, o sea en un rango de milésimas por unidad de volumen total de concreto. (Schlumpf et al., 2011). La base química de estos aditivos son los silicatos, aluminatos e hidróxidos, y su dosificación comprende rangos de trabajo en torno al 4 – 6 % en el caso de los aluminatos [Tabla 2.2], del 8 – 12 % en el caso de los silicatos, y del 4 – 8 % en el caso de los libres de álcali [Tabla 2.2], siempre referido sobre el peso del cemento/aglomerante (Rey, 2006).

Propiedades	Tipo Acelerantes		
	A base de aluminato alcalino	A base de silicato alcalino	Libres de álcalis
Rango de Dosificación	3 – 6 %	12 – 15 %	4 – 7 %
Valor de pH	13 – 14	12 – 13	3
Na ₂ O equivalente	20%	12%	< 1 %
Resistencia muy temprana con la misma dosis	++++	++++	++
Resistencia Final	+	--	+++
Impermeabilidad	++	--	+++
Comportamiento de Lixiviación	---	--	-
Salud Laboral	---	-	+++
Seguridad Laboral y de Transporte	--	-	+++
	+ Mejorar	- Deterioro	

Tabla 2.2 Tipos de acelerantes y sus propiedades (Schlumpf et al., 2011)

Aparte de la dosificación la tabla 2.2 muestra distintas propiedades que tiene cada tipo de acelerante, en conjunto con su incidencia en el producto final. Esta comparación muestra que los menos nocivos son los acelerantes libres de álcalis y los más dañinos son los acelerantes con base en aluminatos alcalinos.

2.5.2.1 Acelerantes ricos en álcalis (AR).

Los primeros acelerantes eran polvos constituidos de aluminatos solubles, carbonatos y silicatos (Seabrook et al., 1995). Usados sistemáticamente en las mezclas proyectadas eran productos de base alcalina (contienen altas cantidades de iones alcalinos), los cuales eran sustancias agresivas para los seres humanos y el medio ambiente (Prudêncio, 1998; Ramachandran, 1990). La familia de acelerantes estaba compuesta por silicatos y aluminatos de sodio o potasio modificados (Ramachandran, 1990). Los silicatos modificados se caracterizaban por un efecto rápido (por debajo de 10 segundos); aun así, proporcionaban una resistencia inicial baja y un largo tiempo de fraguado

(más de 30 minutos). El producto formado era en realidad amorfo debido al alto contenido de alcalinidad, lo que implicaba una gran pérdida de resistencia a largo plazo (Ramachandran, 1990).

Los aluminatos de sodio y potasio volvieron obsoletos los basados en silicatos modificados. En la actualidad, son los acelerantes más comunes usados en mezclas proyectadas (Austin, 2002; Prudêncio, 1998). Estos interactúan durante el proceso de hidratación incrementando la transformación del C_3A del cemento a monosulfato de aluminio y proporcionando una ganancia extra de resistencia inicial (Ramachandran, 1990). Estos acelerantes producen una resistencia inicial razonable, pero las propiedades finales de las mezclas proyectadas se ven afectadas negativamente, es decir, la resistencia final se reduce y el hormigón genera lixiviado fácilmente producto de la infiltración de agua. Este último efecto genera más problemas en el caso de sistemas de drenaje pues estos se obstruyen rápidamente debido al lixiviado. La durabilidad en general es un problema ya que debido a las grandes cantidades de iones alcalinos introducidas por el acelerante, se incrementa el riesgo de reacción álcali sílice en las mezclas proyectadas o alcalina de los agregados (Metha & Monteiro, 2006; Ramachandran, 1990; Schlumpf et al., 2011).

Estos acelerantes producían efectos negativos en el rendimiento de las mezclas proyectadas, además de la seguridad durante la aplicación y en cuanto a la durabilidad del hormigón (Schlumpf et al., 2011). Finalmente, el problema más grave de usar acelerantes a base de aluminatos no es el aspecto técnico sino el ambiente por razones ecológicas y de seguridad. Los aluminatos son componentes químicos con un pH mayor de 11 por lo que son fuertemente alcalinos. Pueden tener impactos negativos en el medioambiente, contribuyendo a la salinización, el estrés hídrico en el suelo y un desequilibrio del pH de aguas sensibles (Prudêncio, 1998). Son peligrosos pues provocan quemaduras en el tejido humano, o sea piel y ojos. Esto sucede en contacto directo (piel, ojos), así como por aerosoles de este tipo de acelerante y son muy perjudiciales para la respiración (pulmones) (Schlumpf et al., 2011).

2.5.2.2 Acelerantes libres de álcalis (AF).

Los acelerantes libres de álcalis son un tecnología nueva y en crecimiento para la aplicación segura de mezclas proyectadas en soportes subterráneos (Dinoia & Sandberg, 2004). Estos se han convertido en el estándar en aplicaciones de altas exigencias de mezclas proyectadas, en todo el mundo producto de los beneficios que proporcionan sobre los acelerantes ricos en álcalis (Dinoia & Sandberg, 2004; Schlumpf et al., 2011). Algunos de estos beneficios son la mejora del fraguado y el desarrollo de las características de resistencia, así como propiedades favorables con respecto a la aplicabilidad y el medio ambiente, salud y seguridad (Dinoia & Sandberg, 2004; Schlumpf et al., 2011). A pesar de estas ventajas, son necesarias altas dosis de acelerantes álcali libres para lograr propiedades equivalentes a las obtenidas con acelerantes alcalinos a corto plazo (Issac Galobardes Reyes, 2009; Prudêncio, 1998). Sin embargo, la química de los acelerantes libres de álcalis, el mecanismo de aceleración y la interacción entre diferentes tipos de cemento y la química de los aditivos aún no es muy bien comprendida (Dinoia & Sandberg, 2004).

Un aspecto fundamental del uso de acelerantes libres de álcalis es, sin duda, el factor económico. Al margen de las ya mencionadas ventajas relativas a la salud y seguridad en el trabajo, cabe destacar la posibilidad de optimizar la fórmula de trabajo reduciendo la cantidad de cemento para obtener la resistencia final requerida. Recientes aplicaciones han permitido diseños de mezcla con 310 kg de cemento/m³, para obtener resistencias de 30 MPa a 28 días (Rey, 2006).

2.6 DURABILIDAD.

Según la orientación de las normas actuales, se certifica la durabilidad como propiedad fundamental para el diseño de estructuras de hormigón. Las instituciones normativas a nivel mundial como la ACI (American Concrete Institute) la instrucción EHE, las normas ASTM, entre otras, señalan la durabilidad como factor fundamental para el diseño de estructuras.

En la EHE-08 se define la durabilidad de una estructura de hormigón como “la capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural”. Plantea que la durabilidad del hormigón es la capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas o químicas agresivas y proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos metálicos embebidos en el hormigón durante la vida de servicio de la estructura. (EHE-08, 2008).

La ACI 201-2R define la durabilidad de mezclas de cemento portland como su capacidad para resistir la acción de meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Expresa que un hormigón durable debe conservar su forma calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente (Neill et al., 2001). De esta manera se entiende que la durabilidad no depende únicamente de la elaboración del concreto sino del medio al que este se exponga (Garzón Pire, 2013).

Una estrategia correcta para la durabilidad debe tener en cuenta que en una estructura puede haber diferentes elementos estructurales sometidos a distintos tipos de ambiente (EHE-08, 2008). Siguiendo la guía de la ACI 201-2R, a continuación se presentan los diferentes agentes que pueden afectar la durabilidad del hormigón (Neill et al., 2001);

- Hielo y deshielo.
- Exposición a agentes químicos.
- Abrasión.
- Corrosión de metales u otros metales embebidos en el concreto.
- Reacciones químicas de los agregados.

El desarrollo de esta investigación y experimentación se centrará en la exposición frente a agentes químicos, de forma específica los causados por sulfatos en mortero proyectado con técnica de aplicación húmeda (Wet-mix).

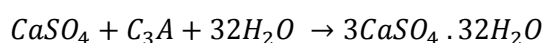
2.6.1 Exposición a ataques químicos del mortero proyectado.

El ion sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ion sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales. En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario. (Garzón Pire, 2013).

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad. La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2 o CH) y fundamentalmente sobre el C_3A y el ferro aluminato tetra-cálcico (C_4FA). El AS se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce el hormigón a un estado quebradizo y hasta suave. (Garzón Pire, 2013). A continuación se mencionan algunos de los efectos característicos para cada tipo de AS (De Gonzáles, 1991);

- La acción del *sulfato de calcio* (CaSO_4) es relativamente simple, ataca al C_3A y en menor medida al C_3FA , produciendo sulfoaluminato tricálcico (Etringita) e hidróxido de calcio (Portlandita).
- La acción del *sulfato de sodio* (Na_2SO_4) es doble, reacciona primero con el CH generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al C_3A formando Etringita
- La acción del *sulfato de magnesio* es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el pH de las pastas de cemento.

De los cuatro compuestos de cemento Portland (C_3A , C_4FA , silicato bicálcico C_2S y silicato tricálcico C_3S) el más vulnerable es el C_3A . Este compuesto reacciona con el CaSO_4 más 32 moléculas de agua ($32\text{H}_2\text{O}$) formándose un sulfoaluminato cálcico llamado Etringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3 \text{CaSO}_4$) que es poco soluble y que crea muy fuertes presiones por su aumento de volumen (expansión) que es alrededor de 2.3 veces el original.



Ec. 2.1

Como es descrito por diferentes autores (Cortes Gomez, 2002; Grübl & Rübl, 1998), el sulfato de sodio es más agresivo que el de calcio y el de magnesio. Su ataque sobre el concreto puede ser físico o fisicoquímico, se da por reacción con el aluminato cálcico hidratado, generando la formación de yeso en los capilares y espacios vacíos. Este efecto inicialmente aumenta la compacidad del concreto pero como el yeso es un compuesto expansivo, finalmente deteriora el material (Cortes Gomez, 2002).

2.6.2 Ataque sulfático (AS).

El ataque sulfático (AS) es un término utilizado para describir un conjunto complejo de procesos químicos y físicos entre los iones de sulfato, y los componentes del hormigón, principalmente la pasta de cemento, provenientes de una fuente externa o interna, como la exposición del hormigón a sulfatos y humedad (Neville, 2004; Skalny, Marchand, & Odler, 2002).

El AS no solo involucra las prácticas constructivas e ingeniería civil, también involucra química, ingeniería de suelo y experimentación en campo y laboratorio. A pesar de que sus causas y efectos han sido extensamente estudiados durante décadas, desencadenando la publicación de una extensa literatura sobre el tema, aún existe mucha controversia en temas básicos dentro del fenómeno del AS y los mecanismos de deterioro causados por él. Básicamente la controversia se encuentra en el mecanismo de expansión, debido a la formación de etringita y en el papel que juega el yeso en el mismo (Neville, 2004).

2.6.2.1 Formas de ataque por sulfato.

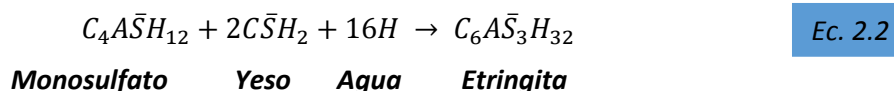
La formación de sulfatos más comunes son; sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio, que ocurren naturalmente en el suelo o disueltos en el agua que corre por el suelo o presentes en agregados (por ejemplo, pirita) la principal fuente de estos sulfatos son las aguas freáticas (Collepari, 2003; Garzón Pire, 2013; Londoño Gómez, 2014). El sulfato puede estar presente también en los afluentes y desechos industriales tales como los de industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería. El agua empleada en las torres de enfriamiento también puede contener sulfatos debido a la acumulación gradual de sulfatos provenientes de la evaporación (Garzón Pire, 2013).

En cuanto al mecanismo para conocer si se está en presencia de un AS, existen dos vertientes científicas: La primera expresa que un AS se da cuando se encuentran sulfatos involucrados, independientemente de los mecanismos que actúan. La segunda limita el concepto de AS a las consecuencias producto de reacciones químicas entre los iones de sulfato y la pasta de cemento hidratada, de modo que los cambios químicos en la pasta se llevan a cabo (Neville, 2004).

La química del AS es independiente de la fuente de sulfato. Las diferencias en las consecuencias de cualquier ataque por sulfatos son causadas por las condiciones físicas y ambientales en las cuales se producen estas reacciones (Skalny et al., 2002). La diferencia entre un ataque sulfático físico o químico, es que en el ataque químico es indispensable que se involucren iones de sulfato. Mientras que el ataque físico involucra la cristalización de sales, en las cuales un ejemplo son sulfatos (Neville, 2004).

De acuerdo a la ACI 201 existen dos mecanismos que pueden ser considerados como ataques sulfáticos: la formación de yeso (gypsum) y la formación de etringita. Se considera que el producto de ambas reacciones puede provocar daños en el hormigón por incrementar el volumen total de sólidos (Neill et al., 2001). Estas dos manifestaciones de AS son expansiones (causadas en primer lugar por la formación de etringita y posiblemente de yeso) y una pérdida progresiva de resistencia y masa (causada por el deterioro de la cohesión de los productos de hidratación de cemento) (Metha & Monteiro, 2006; Skalny et al., 2002). (Skalny et al., 2002).

En numerosas fuentes bibliográficas, el AS se clasifica en químico contra físico y en internos contra externo. El ataque químico por sulfatos se considera como el resultado de reacciones químicas que implican el anión sulfato, SO_4^{2-} . Ejemplo de dicha reacción es la formación de monosulfato, yeso y etringita, de acuerdo con la siguiente reacción estequiométrica (Skalny et al., 2002);



Ec. 2.2

En la notación química del cemento, estos componentes se presenta como C: CaO, \bar{S} : SiO_2 , A: Al_2O_3 , S: SO_3 , H: H_2O , F: Fe_2O_3 (Mindess, Young, & Darwin, 2003). Se conoce que el resultado de la reacción incrementa el volumen sólido del sistema, y puede o no causar una expansión del concreto. La mayoría de los autores investigados consideran el término “ataque físico por sulfatos” o “cristalización de sulfato salino (sulfate salt crystallization) o mal de hidratación salina (salt hydration distress)” desatinado y por lo general se refiere a (Skalny et al., 2002):

- a) Formación a partir de la solución de sulfato de sodio decahidratado $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$, seguido por
- $$2Na^+ + SO_4^{2-} \rightarrow Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$$

Ec. 2.3

(Solución) (Evaporación) (Sólido)

- b) Su recrystalización repetida en anhidrita de sulfato de sodio, Na_2SO_4 , y viceversa:
- $$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O \leftrightarrow Na_2SO_4$$

Ec. 2.4

(Mirabilita) (Recrystalización Repetida) (Thenardita)

Este proceso depende de la temperatura y conduce a aumento repetido en volumen, por lo tanto, si el proceso que ocurre dentro de la matriz de hormigón dará lugar a la fatiga de la pasta de cemento y su posterior pérdida de cohesión (Skalny et al., 2002).

El ataque sulfático interno (ASI) [Fig. 2.4] se refiere a situaciones donde la fuente de sulfatos es interna del hormigón. La fuente de sulfato puede ser el cemento, materiales complementarios, como cenizas volantes o escoria, el agregado, los aditivos químicos, o el agua (Skalny et al., 2002). Un enfoque holístico brindado por Collepardi [Fig. 2.4], proporciona información derivada y resumida sobre los diferentes factores que influyen en las tres características específicas que dan origen al ASI.

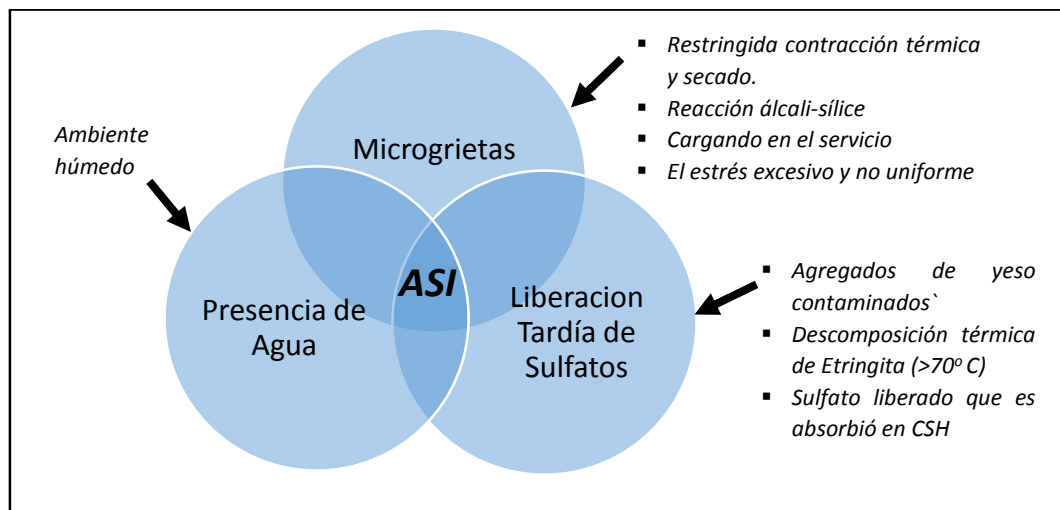


Figura 2.4 Representación ternaria de la DEF relacionada con ASI (Collepardi, 2003)

EL ataque sulfático externo (ASE) [Fig. 2.5] es causado por una fuente externa al hormigón. Estas fuentes incluyen sulfatos de las aguas subterráneas, suelo, residuos sólidos industriales y fertilizantes, SO_3 atmosférica o de residuos industriales líquidos (Skalny et al., 2002).

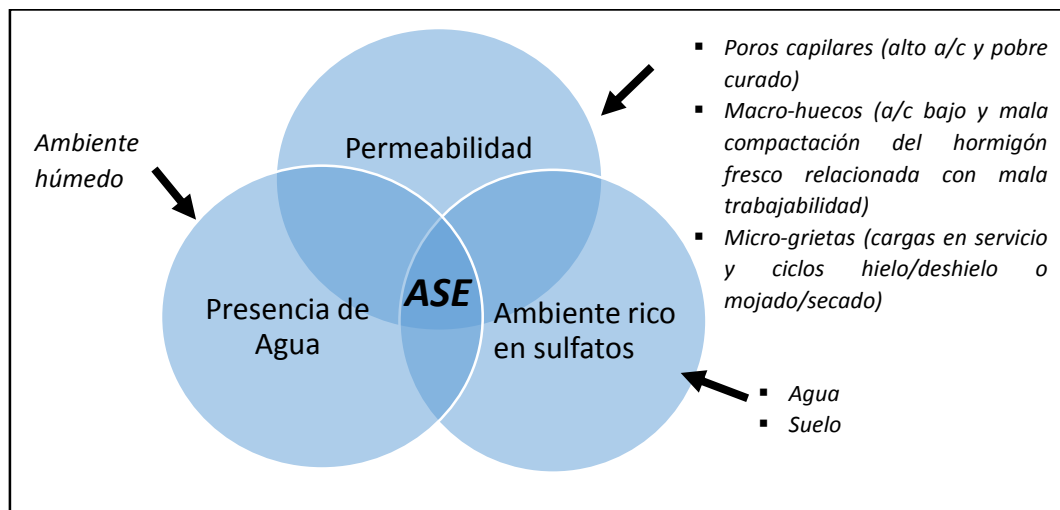


Figura 2.5 Representación ternaria de la DEF relacionada con ASE (Collepardi, 2003)

La figura 2.5 muestra la interacción necesaria entre la permeabilidad del hormigón, un ambiente rico en sulfatos y la presencia de agua para que se produzca un ASE. Cada fase debe presentar ciertas características para la formación de etringita. La permeabilidad puede ser provocada por poros capilares con una alta relación agua cemento con pobre curado, macro-poros o micro-grietas que pueden ser producto de ciclos de hielo/deshielo o mojado/secado. Mientras el ambiente sulfático depende del suelo o agua.

2.6.2.2 Mecanismos de deterioro por sulfatos.

El mecanismo del AS es tratado como un proceso físico-químico que provoca algún tipo de consecuencia físico-mecánica. Algunas de estas consecuencias incluyen cambios de permeabilidad y porosidad, estabilidad volumétrica, resistencia a flexión y compresión, módulo de elasticidad, endurecimiento, etc. Todos estos cambios dan como resultado una pérdida en la durabilidad y por ende la reducción del tiempo de servicio de la estructura (Skalny et al., 2002). Según diferentes autores se destacan principalmente dos reacciones químicas involucradas entre el AS y la pasta de cemento hidratada (Garzón Pire, 2013; Neville, 2004):

- Reacción del sulfato sódico con hidróxido de calcio para formar sulfatos de calcio (yeso). Esta reacción puede tener mayor o menor incidencia, dependiendo de las condiciones. En el agua y su flujo, si el suministro de sulfato sódico es constante y la eliminación de hidróxidos de calcio, la reacción puede continuar hasta completar, es decir, la lixiviación de todo el hidróxido de calcio (que es un producto importante en la hidratación del cemento, en base al volumen). De lo contrario se alcanza el equilibrio.
- Reacción del Na_2SO_4 con el C_3A , usualmente por la formación de monosulfo de aluminio para formar monosulfoaluminato de calcio (Etringita).

Estas dos reacciones dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causa de la expansión y descomposición de las mezclas expuestas a soluciones de sulfatos (Garzón Pire, 2013). En el caso de Na_2SO_4 , el uso de cemento con un bajo contenido de C_3A (que se convierte en calcio aluminato hidratado C-S-H) minimiza la extensión de la reacción con Na_2SO_4 y, por ende la formación de etringita (Neville, 2004). Esto puede conducir a la expansión, pero ver etringita en concreto no significa necesariamente que esta haya causado tensión expansiva (Taylor, 1993).

Los componentes principales del cemento Portland son C_3S , C_2S , C_3A y C_3FA . Los componentes del cemento reaccionan con el agua y yeso añadido de forma externa para formar varios productos de hidratación de cemento. Si la hidratación no se completa, algunos de los componentes del cemento permanecen sin reaccionar (Sarkar, Mahadevan, Meeussen, Slood, & Kosson, 2010).

El proceso secuencial de las reacciones se observa en la Figura 2.6 los iones de sulfato reaccionan con la Portlandita para formar yeso y con algunas fases de calcio aluminato (aluminato tricálcico y monosulfo) para formar etringita [flechas claras de la Fig. 2.6] (Ikumi Montserrat, 2013; Sarkar et al., 2010). El yeso formado reacciona con las fases calcio aluminato (si hay disponibilidad) para formar etringita [líneas gruesas Fig. 2.6] inicialmente sin los iones de calcio aportados por la portlandita. Cuando la portlandita no está disponible, el Silicato Cálcico Hidratado (CSH) se descompone en gel de sílice, liberando iones de calcio [línea azul Fig. 2.6] para formar etringita (Brown & Taylor, 1999; Sarkar et al., 2010).

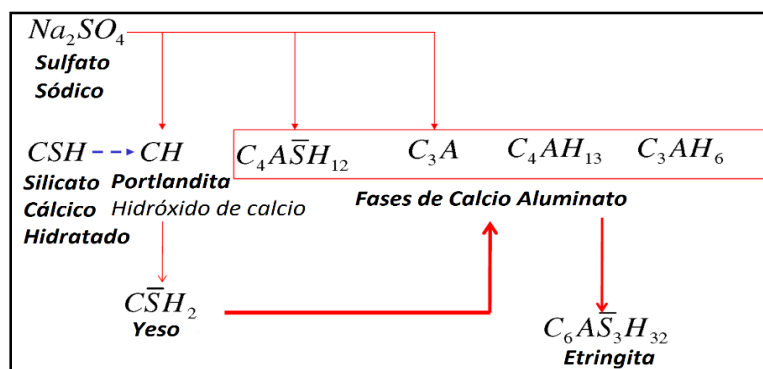
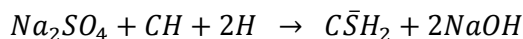


Figura 2.6 Diagrama esquemático de las reacciones químicas debido a la entrada de sulfato (Sarkar et al., 2010)

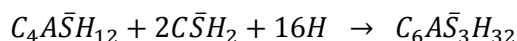
Algunos de los principales productos de hidratación son el CSH, calcio hidratado o Portlandita (CH), etringita ($C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$), monosulfoaluminato de calcio ($C_4\bar{A}\bar{S}_3H_{12}$), hidrogranate (C_3AH_6), entre otros [Fig. 2.6]. Cuando iones de sulfato penetran la matriz cementícea del hormigón, se genera una serie de reacciones mostradas en las ecuaciones 2.5 – 2.11. Dichas reacciones implicadas en el AS, asumiendo que la fuente de iones de sulfato sea Na_2SO_4 son las siguientes (Clifton & Pommersheim, 1994; Sarkar et al., 2010; Tixier & Barzin Mobasher, 2003) (donde OH indica lo contrario hidróxido y H indica H_2O):

- Portlandita



Ec. 2.5

- Monosulfato

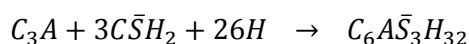


Ec. 2.6

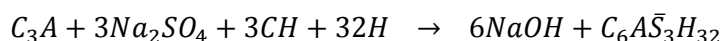


Ec. 2.7

- Aluminato Tricálcico

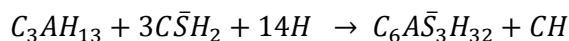


Ec. 2.8



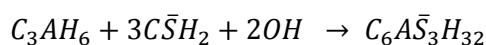
Ec. 2.9

- Aluminato Tetracálcico hidratado



Ec. 2.10

- Hidrogranate



Ec. 2.11

Los principales productos expansivos formados como resultado de las reacciones son etringita y yeso. Los cambios de volumen (ΔV_r) como consecuencia de las reacciones químicas con respecto al volumen original de los reactivos (V_r) se observan en la tabla 2.3.

Reacción	Cambio de Volumen ($\Delta V_r / V_r$)
Portlandita (Ec. 2.5)	1.24
Monosulfato (Ec. 2.6)	0.55
Monosulfato (Ec. 2.7)	0.52
Aluminato Tricálcico (Ec. 2.8)	1.31
Aluminato Tricálcico (Ec. 2.9)	2.83
Aluminato Tetracálcico hidratado (Ec. 2.10)	0.48
Hidrogranate (Ec. 2.11)	0.92

Tabla 2.3 Incrementos de volumen asociados al AS (Clifton & Pommersheim, 1994; Sarkar et al., 2010; Wang, 1994)

El cambio en el volumen conduce a la deformación volumétrica, si el volumen de los productos es mayor que el volumen de los reactivos [Tabla 2.3]. La deformación desarrollada ejerce presión sobre la matriz de cemento circundante [Fig. 2.7]. La estructura comienza a agrietarse cuando la tensión excede la resistencia a la tracción del material. Además, la descomposición del CSH en CH [Fig. 2.6] y gel de sílice resulta en una pérdida de resistencia por que el gel de sílice no es cohesivo. Por lo tanto, los efectos netos del AS son la expansión, agrietamiento y pérdida de resistencia [Fig. 2.7].

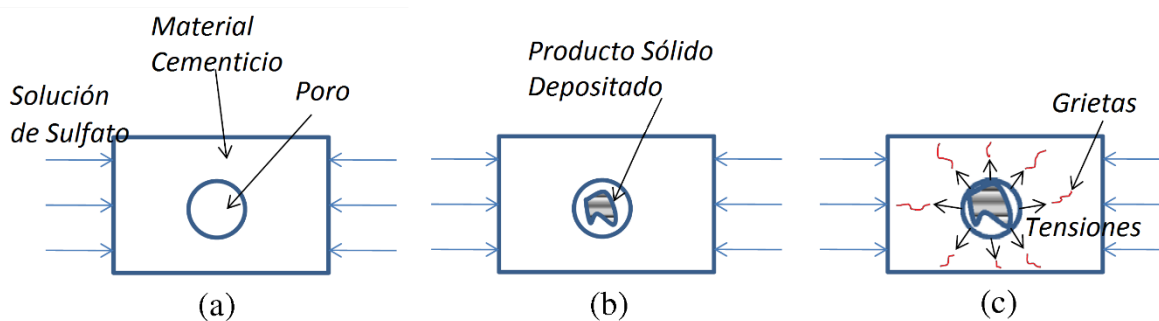


Figura 2.7 Desarrollo del mecanismo de tensiones y agrietamiento (Sarkar et al., 2010)

En la figura 2.7 muestra el desarrollo del mecanismo de agrietamiento debido a disposición de sólidos en los poros del hormigón. A raíz de las reacciones químicas expuestas [Tabla 2.3], se pueden distinguir los diferentes fenómenos físico-químicos englobados dentro del AS. Obedeciendo a la reacción predominante, se pueden desarrollar distintos fenómenos que pueden representar un problema:

- Formación de etringita secundaria,
- Formación de yeso,
- Formación de taumasita,
- Erosión salina.

El proceso de formación de etringita secundaria es el principal responsable de la fisuración y el desprendimiento o descamación del material, como resultado de la expansión producida. Este proceso puede ocurrir con cualquiera de las sales sulfáticas, a excepción de los sulfatos magnésicos (Colleparidi, 2003). Debido a la baja solubilidad de la etringita, ésta se puede formar con concentraciones relativamente bajas de sulfatos (Skalny et al., 2002).

Mientras que la característica más importante de la formación de yeso es la pérdida de resistencia y adhesión de la pasta de cemento debido a la descalcificación del CSH, el cuál es responsable de la capacidad de unión de la misma (P. Mehta, 1992). Este proceso puede ocurrir con todas las sales sulfáticas excepto con CaSO_4 y magnésicos MgSO_4 (Colleparidi, 2003). La formación de yeso y su papel en el daño por expansión aún no están del todo claro (Neville, 2004), de hecho se puede decir que no hay documentación fehaciente que justifique el papel del yeso en la expansión.

Para la reacción que permite la formación de taumasita tenga lugar, se requiere la presencia de iones carbonato en solución, ambientes muy húmedos, así como temperaturas bajas ($< 10^\circ \text{C}$) (Glasser, Marchand, & Samson, 2008). Este es uno de los peores escenarios que se pueden producir, dado que la taumasita se forma a partir del gel CSH, provocando por tanto la desagregación del hormigón.

2.7 FACTORES QUE INFLUENCIAN EL AS EN EL MEZCLAS PROYECTADAS.

Los principales factores influyentes en las repercusiones estructurales del hormigón producto de un AS son (Ouyang, Nanni, & Chang, 1988): Composición del cemento, permeabilidad, relación A/C, utilización de aditivos, adiciones y el medio agresivo.

2.7.1 Composición del cemento.

La relación entre la resistencia a sulfatos del cemento Portland y su contenido de C_3A está bien establecida. El contenido de C_3A está directamente relacionado con la expansión asociada al AS, dado que éste determina el contenido de fase AFm en la matriz cementícea hidratada, que a mayores contenidos reacciona con los iones sulfato para formar etringita (Glasser et al., 2008). Es por ello, que la mayor parte de normativas regulan los contenidos de aluminatos (C_3A y C_4AF) del clinker.

El cemento portland que contiene menos de 5% de C_3A ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo (Garzón Pire, 2013). Los cementos con contenidos de C_3A superiores a un 5%, tendrán la mayor parte de los aluminatos hidratados formando fases monosulfoaluminato – bien $C_4\bar{S}H_{12}$ o $C_4\bar{S}H_{18}$ – (Al-amoudi, 2002). Si el contenido de C_3A es superior al 8%, los aluminatos formarían parte también de fases hidrogranate [Ec. 2.11]. Ambas fases reaccionan con los sulfatos para formar etringita.

La influencia del contenido de aluminatos en el AS es influenciada por la morfología de las fases de aluminato en el clinker (Neville, 2004). Estudios han demostrado que los cementos que contienen potencialmente menos hidróxido de calcio en la hidratación se comportan bien en exposición de sulfatos. Los cementos especificados para el AS, de acuerdo a su contenido de C_3A , son el tipo II (ataque moderado) y V (ataque severo) (Garzón Pire, 2013).

2.7.2 Permeabilidad y relación Agua- cemento.

La permeabilidad es uno de los factores fundamentales que condicionan la durabilidad de un hormigón. DePuy estableció el primer requisito para una buena resistencia “Un hormigón impermeable de alta calidad”. Esto requiere buena mano de obra (mezclas factibles, buena consolidación, un acabado duro y buen curado), y el uso de una buena mezcla con una baja relación agua/cemento (a/c) (DePuy, 1994; Neville, 2004). La importancia de obtener un hormigón de baja permeabilidad es resaltada por innumerables autores (Al-amoudi, 2002; Neville, 2004; Skalny et al., 2002; Taylor, 1993). Un hormigón mal compactado es particularmente vulnerable a los ataques químicos (BRE, 2003). Los efectos (de sulfato) se reducen al mínimo en un hormigón denso de baja permeabilidad y mediante el uso de un cemento resistente al sulfato, en el que hay poca o ninguna fase de aluminato (Taylor, 1997).

Uno de los factores más importantes en la obtención de una permeabilidad apropiada es la relación a/c en conjunto con su tiempo de curado. Existen muchas normativas que limitan el ratio máximo de a/c en mezclas expuestas a sulfatos (Glasser et al., 2008). Una baja relación a/c en las mezclas no necesariamente significa una permeabilidad reducida a causa de la influencia significativa de los agregados (Shah, Wang, & Weiss, 2000). Específicamente si se considera el agrietamiento a edades tempranas a ser un factor en asegurar la durabilidad como sucede en el mortero proyectado.

Una baja relación a/c no siempre es beneficiosa, pues puede propiciar un grado de avance mayor del AS, al tener una porosidad menor y, por tanto, menor espacio para acomodar los productos generados por el AS (Neville, 2004). Naik sostiene una posición diferente a la de otros autores donde inicio y la progresión de la deterioración física del hormigón, ocurren más rápido en ratios bajos de a/c (Naik et al., 2006), esto se aprecia en las razones de permeabilidad de la figura 2.5.

2.7.3 Utilización de aditivos y adiciones.

Los aditivos y adiciones más empleadas en el mortero proyectado por vía húmeda son los acelerantes (líquido o en polvo), los súper-plastificantes, el humo de sílice (polvo o slurry), los estabilizadores de fraguado, los reductores de rebote, las fibras de acero o polipropileno y las cenizas volantes.

La utilización de aditivos – acelerantes – ha sido bien redactado en la sección 2.5.2. La utilización de adiciones (humo de sílice, cenizas volantes, escoria de alto horno) bien como parte del cemento o como adición al hormigón, contribuyen de manera general a aumentar la resistencia del hormigón frente a AS (Al-amoudi, 2002; Glasser et al., 2008; Neville, 2004). Se debe tener en cuenta la composición de la adición, en los casos de escorias de alto horno y cenizas volantes; dependiendo de su composición, pueden proporcionar productos que, a medio y largo plazo, generen productos expansivos por efecto del AS (Taylor, 1993). En el caso de las cenizas volantes, influye en su comportamiento frente al AS el contenido de CaO que presenten (Bonakdar, Mobasher, Pr, & Pr, 2010; Tikalsky & Carrasquillo, 1993). Los aditivos que contienen cloruro de calcio afectan desfavorablemente la resistencia al AS.

2.7.4 Medio agresivo.

Las características del medio agresivo – concentración y tipo de catión asociado – presentan una especial importancia en el grado de avance del AS, estando además, ambas cuestiones íntimamente relacionadas (Ikumi Montserrat, 2013). En la Tabla 2.4 se muestran valores de solubilidad en agua a 20° C de las principales sales sulfáticas implicadas en el AS. De todas las sales sulfáticas, el sulfático cálcico (yeso) es la más insoluble de todas, por lo que se puede decir que el AS normalmente es asociable con la presencia de sulfato magnésico o sulfato sódico (Al-amoudi, 2002).

Sal Sulfática	Solubilidad	$[SO_4^{2-}]_{aq}$ (g/l)
Sulfato de Sodio (Na_2SO_4)	195	131.87
Sulfato de Potasio (K_2SO_4)	111	61.19
Sulfato de Calcio ($CaSO_4$)	2.1	1.48
Sulfato de magnesio ($MgSO_4$)	255	230.51

Tabla 2.4 Solubilidad y concentración de sales sulfáticas en agua a 20° C (Eglinton, 1998)

Se conoce que en todos los casos, la calidad de sulfato se expresa en partes de SO_4 en miligramos por kilogramo de agua, es decir, en ppm (partes por millón), generalmente sin consideración del tipo de catión en el sulfato (Neville, 2004). Si la sal implicada en el AS es yeso, el contenido máximo de sulfatos que se debería encontrar en una muestra de agua es de 1.48 g/l [Tabla 2.4]; contenidos mayores indicarían la presencia de otras sales sulfáticas (Eglinton, 1998; Ikumi Montserrat, 2013). A continuación se muestran las principales reacciones y productos formados, en función al AS (Neville, 2004):

2.7.4.1 Sulfato sódico.

El $CaSO_4$ reacciona sólo con los aluminatos de calcio hidratados para formar sulfoaluminato de calcio, mientras el Na_2SO_4 reacciona con el hidróxido de calcio libre en el cemento fraguado para formar $CaSO_4$, que luego reacciona con los aluminatos (Eglinton, 1998). Esto ha sido descrito en apartados posteriores [Sec. 2.6, 2.7], donde se muestran las reacciones químicas que se producen. El Na_2SO_4 se estudia por su incidencia en la formación de Etringita secundaria. Los factores más importantes en este son el contenido de C_4AF , aun cuando son menos perjudiciales que el C_3A , contribuye a una fase

similar pero menos expansiva de Etringita (Al-amoudi, 2002). El otro factor es la formación de yeso, aun cuando su rol en las expansiones globales aún no está muy claro (Neville, 2004).

2.7.4.2 Sulfato magnésico.

El MgSO_4 tiene una acción de mayor alcance que otros sulfatos y descompone los silicatos de calcio hidratados, además de reaccionar con los aluminatos y el hidróxido de calcio (Eglinton, 1998). A diferencia del hidróxido sódico, el hidróxido de magnesio es insoluble y su solución saturada tiene un pH bajo en comparación con el pH en el caso de ataque por Na_2SO_4 (Rasheeduzzafar, Al-Amoudi, Abduljauwad, & Maslehuddin, 1994). El pH bajo desestabiliza la etringita y el gel CSH (Hewlett, 2004), por lo que la etringita secundaria no se forma. El efecto pernicioso de este ataque, viene por la transformación de la fase CSH a una fase MSH sin propiedades ligantes (Rasheeduzzafar et al., 1994). Además, si el silicato dicálcico o tricálcico se coloca en una solución de MgSO_4 , la formación de cristales de yeso se produce rápidamente (Eglinton, 1998). Por lo que este ataque se caracteriza por un reblandecimiento y deterioro de las capas superficiales del hormigón y de la formación de yeso y brucita.

2.8 EXPERIMENTOS SOBRE AS EN MEZCLA CEMENTÍCEAS.

El AS se ha investigado desde el siglo XIX. El análisis por inmersión de muestras en grandes volúmenes o en soluciones renovadas es comúnmente usado para estudiar el AS (Bellmann, Mo, & Stark, 2006; Hidalgo, Petit, Domingo, Alonso, & Andrade, 2007; Tian & Cohen, 2000). La medición de expansión es el método más común a utilizar para predecir o evaluar la resistencia a los sulfatos, pues los ensayos no destructivos son fáciles de realizar.

La expansión es principalmente causada por la formación de yeso y Etringita [Sec. 2.7.2] (de Almeida, 1991), el yeso ocupa un volumen de 2.24 veces mayor que los compuestos originales, y la formación de Etringita conduce a un aumento de volumen de 2.5 -3.27. aunque no todos los autores están de acuerdo con el hecho de que la formación de yeso provoque expansión (Tian & Cohen, 2000; Tittelboom, Belie, & Hooton, 2013). Distintas fuentes literarias muestran que, dependiendo de la concentración y forma de sulfatos, el ambiente local, condiciones y prácticas de elaboración, las formaciones de yeso y etringita no necesariamente tiene que ser expansivas y los daños al concreto pueden ser por mecanismos distintos al aumento de volumen de sólido (Brown & Taylor, 1999; P. K. Mehta, 2000; Taylor, 1997).

En el caso de Na_2SO_4 , el uso de cemento con bajo contenido de C_3A (que se convierte en C-S-H) minimiza la reacción extendida con Na_2SO_4 y, por esto se forma la Etringita. Esto puede provocar expansión pero como sugieren distintos autores (Brown & Taylor, 1999; Neville, 2004; Taylor, 1993) “ver Etringita en concreto no necesariamente significa que esta cause las expansiones”.

A continuación, se presenta la tabla 2.5 donde se organizan a modo resumen las investigaciones que involucran el ensayo de muestras frente a algún tipo de AS. Se exponen investigaciones realizadas tanto en mezclas convencionales como en mezclas proyectadas.

Autor	Investigación	Edad de Exposición
Mezclas convencionales		
(Rasheeduzzafar et al., 1994)	Magnesium-sodium sulfate attack in plain and blended cements	15 días
(Lipus & Puntke, 1996)	Sulfate resistance of concretes with different compositions	14 días
(Monteiro et al., 2000)	Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cements for Caltrans LLPRS Program	7 días
(Tian & Cohen, 2000)	Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion?	15 días
(Al-amoudi, 2002)	Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments	14 días
(Mielich & Ötll, 2004)	Practical investigation of the sulfate resistance of concrete from construction units	2 días
(Bellmann et al., 2006)	Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen	14 días
(Naik et al., 2006)	Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD: Influence of cement type, water-to-cement ratio, and aggregate	14 días
(Schmidt, 2007)	Sulfate Attack and the Role of Internal Carbonate on the Formation of Thaumasite	57 días
(Glasser et al., 2008)	Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions	-
(Tae et al., 2008)	Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature	6 días
(Lee et al., 2009)	Sulfate Attack of Cement Matrix Containing Inorganic Alkali-free Accelerator	-
(Rozière et al., 2009)	Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks	28 días
(Akpınar & Casanova, 2010)	A combined study of expansive and tensile strength evolution of mortars under sulfate attack: implications on durability assessment	-
(Irassar et al., 2010)	Limestone Filler Cements: Thaumasite Formation Due to the Sulphate Attack	28 días
(Senhadji et al., 2010)	Sulfate attack of Algerian cement-based material with crushed limestone filler cured at different temperatures	28 días
(Corral-Higuera et al., 2011)	Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Concrete with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials	28 días
(Abbas Al-Anburi, 2012)	effect of ESA on self-compacted concrete	28 días
(Aguirre & Gutiérrez, 2013)	Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions	28 días
(Torréns-Martín & Fernández-Carrasco, 2013)	Effect of sulfate content on cement mixtures	7 días
(Ryou et al., 2015)	Durability of Cement Mortars Incorporating Limestone Filler Exposed to Sodium Sulfate Solution	28 días
Mezclas proyectadas		
(Paglia et al., 2002)	An evaluation of the sulfate resistance of cementitious material accelerated with alkali-free and alkaline admixtures, Laboratory vs. field	57 días
(Paglia et al., 2003)	The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems Influence of the temperature on the sulfate attack mechanisms and damage	57 días
(Kim et al., 2008)	CHARACTERIZATION OF deterioration ON THE shotcrete lining IMMERSED IN VARIOUS SULFATE SOLUTIONS	28 días
(Brux, 2009)	Durability of shotcrete with increased sulfate content with the use of alkali-free setting accelerator	-

Tabla 2.5 Investigaciones referentes al AS en mezclas cementíceas.

En la tabla 2.5 se puede apreciar el crecimiento en el interés de la evaluación del comportamiento de las mezclas cementíceas frente al ASE. En la última década se han realizado más estudios referentes al AS que en los 20 años previos. También se observa el desbalance que existe entre las investigaciones en mezclas convencionales y mezclas proyectadas. Esta falta de investigaciones en mezclas proyectadas refleja la necesidad de estudios como este.

Además, se observa que la mayoría de los estudios considera una edad de exposición superior o igual a 14 días desde la producción de las probetas. En el caso de mezclas proyectadas, la edad de exposición inicial suele ser todavía más alta. Esto contrasta con la rápida exposición del material al ASE en obras realizadas con mezclas proyectadas en contacto con el terreno. Por ende, es necesario evaluar la influencia del inicio de exposición en la evolución y el alcance del ASE en mezclas proyectadas.

2.8.1 Investigaciones de AS en mezclas convencionales.

Los autores (Rozière, Loukili, Hachem, & Grondin, 2009) sumergieron muestras de mortero y concreto (CEM I y CEM III) en 3 g/L y 30 g/L de Na_2SO_4 y agua, cambiando la solución de forma mensual. En sus resultados exponen expansión antes de agrietado. Analizan el papel que juega el yeso en la expansión mediante DRX. Concluyen que altas concentraciones de sulfato podrían ser responsables del deterioro potencial de la durabilidad de cementos portland resistentes a sulfatos debido a la formación de yeso.

(Naik et al., 2006) estudiaron muestras con diferentes tipos de cemento (ASTM tipo I y V), con distintas relaciones a/c (0.485 y 0.435) y agregados. Sometidos a una solución con 10,000 ppm de Na_2SO_4 la cual era sustituida semanalmente. Concluyendo que el cemento tipo V presenta menor expansión que el tipo I. Observaron por EDXRD una anti-correlación entre yeso y Etringita, sugiriendo que la Etringita sometida exposición sulfática continua se descompone en yeso. Por otro lado, el inicio y la progresión del deterioro físico (es decir, grietas, desprendimientos, y la desintegración) sucede más rápido en una relación a/c baja.

Los autores (Ryou, Lee, Park, Kim, & Jung, 2015) en su investigación incorporaron relleno de piedra caliza en morteros sometidos a 5% de Na_2SO_4 . En sus resultados visuales establecen que el daño en las probetas inicia por las esquinas y luego en todo el prisma, tanto en las muestras con caliza como la de CEM I. Establecen que el mortero con un mayor porcentaje de caliza presenta un grado de deterioro mayor que aquellos con menor porcentaje o sin caliza. Luego de análisis de resistencias, expansiones y DRX, establece que los morteros con caliza son más vulnerables a un AS.

(Tae, Doug, Jung, Park, & Sik, 2008) sometieron muestras con 4 cantidades de caliza (0, 10, 20 y 30 % por cemento) a soluciones con 33,800 ppm de SO_4^{2-} (Na_2SO_4 y MgSO_4). Analizaron el cambio visual, expansión y microestructura de los especímenes de mortero a temperatura ambiente ($20 \pm 1^\circ\text{C}$). Los resultados demostraron que las muestras de mortero y pasta que incorporan niveles de reemplazo más altos de relleno de piedra caliza eran más susceptibles al ataque por sulfatos independientemente de la fuente del ataque.

(Senhadji, Mouli, & Khelafi, 2010) estudiaron muestras con 4 niveles de relleno de piedra caliza (0%, 10%, 20% y 30% de cemento) sumergidas en una solución con 5% de MgSO_4 por períodos de hasta 360 días. Las muestras se curaron a 5°C (refrigerador, $\pm 2^\circ\text{C}$) y 23°C (ambiente, $\pm 3^\circ\text{C}$) en ambos casos el agua era cambiada cada 3 meses. Sus resultados exponen que las muestras con altos niveles de caliza fueron más susceptibles al AS a bajas temperaturas. Por otra parte, asocian el deterioro con la taumasita, yeso, y la formación de brucita en la solución de MgSO_4 .

2.8.2 Investigaciones de AS en mezclas proyectadas.

El mortero proyectado se caracteriza por una estratificación (capas) difusa debido al procedimiento de aplicación. La interacción y alteración debido a la percolación de agua en túneles resulta en la deteriorización complicada de la textura y zonación química. Las texturas observadas en revestimientos de mezclas proyectadas en construcciones subterráneas indican que su deterioro por ataque químicos es provocado por la falta de homogeneidad en su permeabilidad lo que sirve como vías para la filtración de agua. (Romer, 2003). Asimismo se revela que la relación a/c y el grado de impermeabilidad son de gran influencia en la resistencia a sulfatos (Spirig, 2004).

Los autores (Paglia, Wombacher, Bo, & Sommer, 2002) en su investigación sumergen especímenes de hormigón normal y proyectado con diferentes dosificaciones de acelerantes en soluciones con 5 % Na_2SO_4 y agua destilada, con temperaturas entre 21 – 23° C, y humedad relativa de (HR) 65 ± 3 % durante 546 días. Encontrando que los morteros de laboratorio y cambios de longitud del hormigón proyectado no se correlacionaron. Sin embargo, los acelerantes libres de álcalis presenta una expansión más rápida y mayor penetración del AS, lo que conduce al reblandecimiento y desintegración de las muestras. Mientras las muestras ricas en álcalis muestran una expansión ligera y más retrasada. Además, las muestras sin acelerante no muestran gran daño. Los daños pueden ser consecuencia de la presencia de agregados y diferentes procedimientos y composición de mezclas (Paglia et al., 2002). Otro investigación (Kim, Park, & Lee, 2008) sumerge muestras con 5 % de acelerantes ricos en álcalis en 1, 2, y 5 % de soluciones de Na_2SO_4 hasta 60 semanas. Donde el deterioro del hormigón proyectado fue causado por el yeso, etringita, taumasita. Estos resultados fueron confirmados por XRD, SEM y EDS análisis.

EL Autor (Brux, 2009) en su análisis, expresa que el daño (ablandamiento y la desintegración y craqueo) fue controlado en gran parte por la presencia de iones de Al_3^+ y SO_4^{2-} , que controlan la extensión de la descalcificación gel CSH. Relaciona los iones con la homogeneización de los aditivos en la masa de cemento. Redacta que la formación de etringita durante el almacenamiento a largo plazo se lleva solo en los poros del mortero proyectado, y por lo tanto no provoca tensiones estructurales perjudiciales. La distribución uniforme del acelerante en la mezcla y la mayor porosidad del mortero proyectado tienen un efecto favorable en estructuras de baja tensión.

Para concluir el factor más importante en relación a la resistencia de sulfatos es la composición química del acelerante de fraguado incluida en las mezclas proyectadas. Esto es evidente cuando se compara el valor promedio de la resistencia a sulfatos de mezclas convencionales con el mortero proyectado. El promedio de 0.46‰ de sulfatos es un factor crítico para las mezclas proyectadas, mientras un promedio de 0.20‰ es logrado en las mezclas convencionales sin problemas. Esto demuestra la influencia decisiva de los acelerantes en la resistencia a sulfatos (Spirig, 2004).

3 CAPITULO.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PREÁMBULO.

En este capítulo se exponen los aspectos referentes a la programación experimental del estudio relativo a la durabilidad del mortero proyectado por vía húmeda frente a un ASE acelerado. El estudio tiene como base el mortero proyectado o gunita. Pues el mortero es una representación a menor escala del hormigón, además de que el término “shotcrete” se refiere a todo el material proyectado sin importar el tamaño del agregado (Gedeon, 2005). También se refieren al hormigón proyectado como un mortero transportado que se proyecta a alta velocidad (Hagelia, 2011). Además, las interacciones acelerante/cemento se presentan de manera similar en ambos (Isaac Galobardes Reyes, 2013), lo que certifica la extrapolación de los resultados. Considerando que un Gunitado requiere menor granulometría que un hormigón proyectado normal, esto se traduce en la necesidad de un menor espacio. Todo esto proporciona una ventaja técnica, pues todos los ensayos han de ser llevados a cabo en un laboratorio.

Cabe resaltar que este estudio es parte de una investigación a mayor escala la cual posee un desarrollo investigativo más profundo, por lo que realizan más ensayos en diferentes etapas de la mezcla proyectada y de mayor duración.

3.2 CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

La campaña tendrá lugar en los laboratorios del departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). La campaña se puede agrupar en dos grandes etapas [Fig. 3.1]; la primera es la proyección del mortero a utilizar, mientras la segunda es el sometimiento de las muestras a un ASE acelerado y la observación del comportamiento de las probetas testigo a dicho ataque por medio de diferentes ensayos.

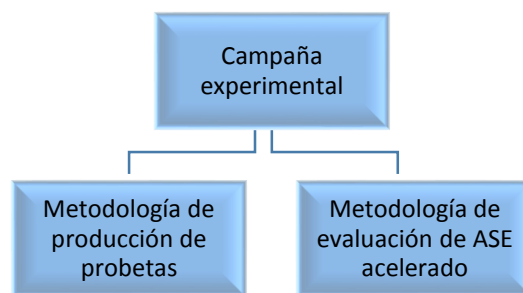


Figura 3.1 Etapas de Campaña Experimental

En la etapa de producción es donde se introducen las diferentes variables de análisis comparativo que poseen las muestras. Estas variables son; distintos acelerantes, distintos cementos y el mortero a distintas edades de exposición [Fig. 3.2].

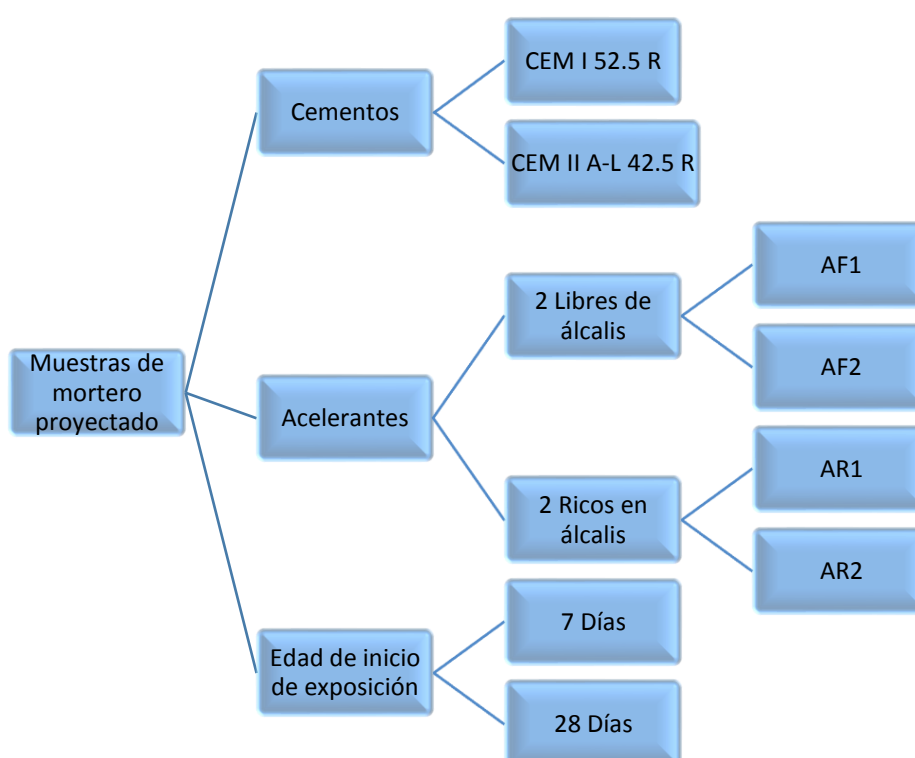


Figura 3.2 Variables de análisis comparativo del experimento

Como se conoce, el tipo de cemento afecta la evolución del ASE en mezclas convencionales, en el caso de mezclas proyectadas ha sido poco estudiado, por lo que representa una variable interesante a tomar en cuenta en el estudio. Los tipos de cemento considerados para han sido los CEM I 52.5 R y CEM II A-L 42.5 R, debido a que son los más utilizados en la realización de mezclas proyectadas en España. De la misma forma también son los más manejados en los estudios de la literatura.

Con el mismo criterio que se seleccionan los tipos de cemento, se han escogido los tipos de acelerante. Estos acelerantes son los ricos en álcalis (AR)¹ y los libres de álcalis (AF)², los cuales poseen una composición química completamente diferente, por lo que su forma de interacción con el cemento es distinta. Estas diferencias pueden producir un comportamiento distinto frente a un ASE acelerado. Se

¹ Nos referimos a los acelerantes ricos en álcalis como AR derivado del inglés Alkali Rich

² Al igual que los AR los acelerantes libres de álcalis serán referidos por su literatura en ingles Alkali Free (AF)

debe resaltar que también se estudian muestras sin acelerantes, por lo que no son proyectadas las cuales servirán como referencia comparativa en el análisis de resultados.

Como se observado en el estado del arte [tabla 2.5] la mayoría de los estudios referentes al AS en mezclas cementíceas de la literatura se realizan cuando las mezclas tienen edad de 28 días lo que no es representativo de la realidad en las mezclas proyectadas. Cuando se observan los pocos estudios realizados en mezclas proyectadas, la mayoría poseen edades de inicio de exposición superiores a 28 días. Por esta razón se decide tomar como variable el tiempo de exposición de las mezclas proyectadas al ASE acelerado. La edad de 28 días se toma como variable representativa de los estudios existentes en la literatura, mientras la edad de 7 días es la variable más cercana a la realidad de aplicación de las mezclas proyectadas.

La segunda etapa del experimento es el sometimiento de las muestras de mortero proyectado a un ASE acelerado, su observación y posterior análisis. Esta fase del experimento se presenta en tres bloques como se observa en la figura 3.3.

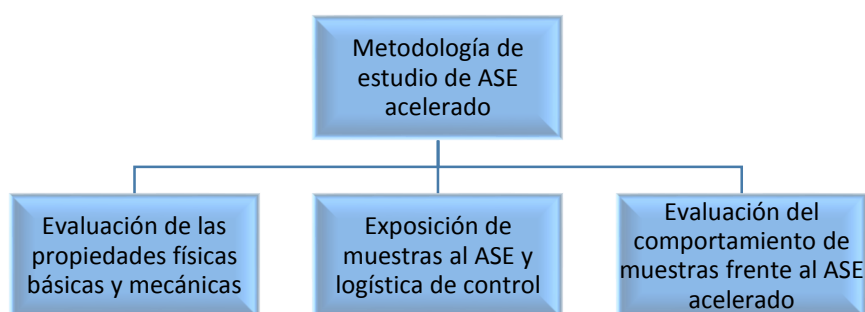


Figura 3.3 esquema de metodología de estudio de ASE acelerado

En el desarrollo del análisis de durabilidad de las muestras se realizan distintos tipos de ensayos a lo largo del experimento [Tabla 3.1].

Ensayos de campaña experimental	Normas
Para evaluar las propiedades físicas y mecánicas	
Ensayo de porosidad	ASTM C 642, 2006
Ensayo de resistencia a compresión	UNE-EN 196-1:2005
Para evaluar el comportamiento frente al ASE acelerado	
Inspección visual	-
Control por ensayo de pH	-
Ensayo de expansión o volumétrico	ASTM C1012, 2004
Ensayo de ultrasonidos o velocidad de pulso ultrasónico	UNE-EN-12504-4 -
Difracción de rayos x (DRX)	-

Tabla 3.1 Ensayos de campaña experimental.

En el proceso de producción/proyección y en la experimentación de ASE acelerado, se trabaja con productos químicos que pueden tener efectos nocivos en la salud. Por esta razón son prioritarias las medidas de seguridad, como uniformes o atuendos protectores a lo largo del estudio.

3.3 METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE PROBETAS.

La figura 3.4 presenta las variables principales a tomar en consideración para la realización de un mortero proyectado. Se deben tener claros y definidos los materiales a utilizar, así como su dosificación, seguido del área donde se realiza la proyección y las condiciones para su realización.

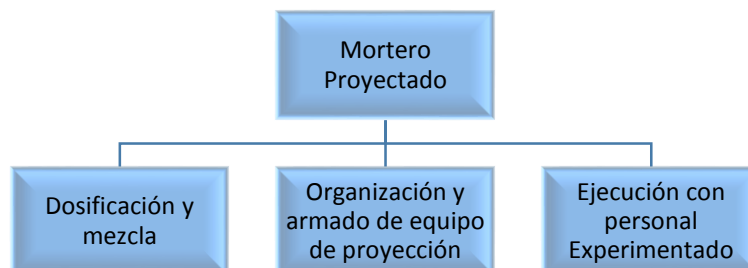


Figura 3.4 Variables de Proyección

3.3.1 Descripción de materiales para proyección por vía húmeda.

Una de las partes esenciales del mortero proyectado son los materiales que lo integran. Por lo que a continuación se describen de forma minuciosa los diferentes materiales utilizados en el proceso de proyección de las probetas testigo que posteriormente se estudian.

3.3.1.1 Cemento.

Para el desarrollo de este experimento se utilizan el CEM I 52.5 R y CEM II A-L 42.5 R. Para observar que tan diferente es la influencia del ASE en función del cemento utilizado en la mezcla. El CEM I 52.5 R es un cemento de alta resistencia, diseñado principalmente para la industria del prefabricado de hormigón. Sus características principales son: Altas resistencias iniciales y finales; Endurecimiento rápido, incluso en tiempo frío (CEMOLINS, 2009a).

El CEM II A-L 42.5 R es un cemento de resistencia media-alta, diseñado principalmente para la industria de mortero premezclado y el mortero proyectado de forma seca. Sus principales características son: Alta resistencia mecánica final; requerimiento de agua de baja y buena manejabilidad; y menor riesgo de agrietamiento (CEMOLINS, 2009b). La tabla 3.2 expone la composición química de ambos cementos, esta fue determinada por el ingeniero químico Renan Pícolo Salvador.

Óxidos	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	PPC ³
CEM I 52.5 R	19.89	3.26	4.74	62.62	1.95	0.99	0.13	3.53	0.03	0.22	0.10	2.54
CEM II A-L 42.5 R	17.61	3.53	4.04	62.48	1.69	0.83	0.13	3.21	0.02	0.18	0.09	6.21
Resultados en % de masa												
Fases/ Compuestos mineralógicos	H ₂ O _{total}	CaO _{C3S+C2S}	Ca(OH) ₂	CaCO ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O	C ₄ AF	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S			
CEM I 52.5 R	0.88	46.67	2.60	4.55	7.58	9.92	7.05	38.86	27.70			
CEM II A-L 42.5 R	1.73	44.99	0.63	12.23	6.90	10.73	4.74	49.41	13.19			

Tabla 3.2 Composición química de cementos

El CEM I 52.5 R es el cemento portland de composición clásica [Anejo B1], mientras el CEM II A-L 42.5 R sustituye un porcentaje de Clinker por Caliza [Anejo B2], el cual sigue la tendencia ambientalista de reducción las emisiones de CO₂ durante la etapa de producción. Estos materiales son subministrados

³ PPC: Perdida por calcinación

por PROMSA del Grupo Ciments Molins, quienes certifican que los cementos suministrados son aptos conforme a la Norma EN 197-1.

3.3.1.2 Agua.

El agua a utilizar en las mezclas es agua destilada, cuyo suministro o fuente es el Laboratorio de Química y Materiales de Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña. Se utiliza con el objetivo de evitar la contaminación de la mezcla por productos químicos no controlados. De esta forma se evita la introducción de químicos que forman parte del sistema de agua potable y se cumple con normas como la UNE- EN 1008-8007.

3.3.1.3 Agregado.

El agregado a utilizar es un árido fino o arena caliza tamizada a 0-1 mm siguiendo las diferentes normas como la UNE-EN 196-1:2005. Este fue suministrado por Àrids Catalunya, a continuación, se muestra su curva granulométrica [Tabla 3.3]:

Apertura del tamiz (mm)	Masa inicial tamiz (g)	Masa final tamiz (g)	Cantidad retenida (g)	Cantidad retenida (%)	Cantidad acumulada (%)
1.250			0.0	0.00	0.00
1.000	502.2	582.9	80.7	8.07	8.07
0.630	451.0	647.9	196.9	19.69	27.76
0.500	468.5	556.1	87.6	8.76	36.52
0.400	431.9	510.9	79.0	7.90	44.42
0.315	424.5	524.4	99.9	9.99	54.41
0.250	442.6	522.5	79.9	7.99	62.40
0.160	417.7	565.6	147.9	14.79	77.19
0.125	433.6	570.4	136.8	13.68	90.87
0.063	429.3	510.9	81.6	8.16	99.03
0.000	356.0	364.1	8.1	0.81	99.84
Total	-	-	998.4	99.84	-

Tabla 3.3 Curva granulométrica arena caliza 0-1mm

3.3.1.4 Súper-plastificante.

El súper-plastificante a utilizar es el SikaPlast T-1120 de SIKA S.A. [Tabla 3.4], es un súper-plastificante de alto rango para morteros proyectados. Este se diseña bajo los estándares de las normas UNE-EN 480-10, UNE-EN 480-12 Y UNE-EN 934-2: 2009.

Función principal	Súper-plastificante
Función secundaria	Retardante del fraguado y estabilizador de la mezcla
Aspecto físico	Líquido marrón
Densidad, 20° C	Aprox. 1.1 gr/cm ³ (kg/L)
pH	4.3 ± 0.5
Contenido en sólidos	34 %

Tabla 3.4 Características del súper-plastificante SikaPlast T-1120 (SIKA, 2011)

Se utiliza un súper-plastificante para mejorar la trabajabilidad y la fluidez del mortero, durante la proyección, sin este el mortero no circula por el conducto y atascaría la boquilla de la pistola de proyección. Su función secundaria [Tabla 3.4] es retardar el fraguado, de esta forma se reduce el endurecimiento de la mezcla durante el transporte.

3.3.1.5 Acelerantes.

En la campaña experimental se manejan cuatro tipos de acelerantes distintos [Fig. 3.2], dos ricos en álcalis y dos libres de álcalis. Por normas de la UPC los nombres de los acelerantes deben permanecer anónimos. Así como el súper-plastificante los distintos acelerantes cumplen con las normas de la UNE para la cantidad de cloruros, alcalinos y el comportamiento ante la corrosión. Aparte de estas normas los acelerantes cumplen con las normas EN 934-5 (T2) y UNE-1819.

3.3.2 Dosificaciones de referencia para proyección.

El porcentaje de aditivos a utilizar se basa en el contenido de cemento en la mezcla. Los acelerantes tendrán diferentes contenidos porcentuales adheridos en el mortero proyectado con cinco dosificaciones [Tabla 3.5]. Las dosificaciones utilizadas fueron las sugeridas por los fabricantes y distintos autores en la literatura (Isaac Galobardes Reyes, 2013; Issac Galobardes Reyes, 2009; J. Galobardes Reyes, 2011; Matos Martínez, 2013)

Acelerantes	Dosificación		
	AF1_5 %	AF1_7 %	AF2_5 %
Libres de Álcalis (AF)			
Ricos en Álcalis (AR)	AR1_3 %		AR2_3 %

Tabla 3.5 Dosificación de acelerantes

Para la relación a/c se utiliza un valor de 0.45, pues es el valor más utilizado en las prácticas de aplicación de mortero proyectado por vía húmeda (J. Galobardes Reyes, 2011). Sin embargo, tomando en cuenta el estudio de caracterización de áridos realizado a la arena caliza a utilizar se determinó que posee una absorción de agua de 5.46 %. Teniendo en cuenta este dato y la relación a/c más utilizada por distintos autores, para contrarrestar el efecto de absorción del árido se incrementa la relación a/c en dicha proporción con lo que se obtiene una proporción a/c de 0.51 [Tabla 3.6].

Material	Cantidad (kg) ⁴	Proporción Relativa
Cemento	30.00	1.00
Árido fino	51.00	1.70
Relación a/c	15.30	0.51
Supe-plastificante	0.30	0.01

Tabla 3.6 Dosificación relativa de mezclas

3.3.3 Fabricación de mezclas cementíceas.

El mortero a proyectar es combinado en una mezcladora modelo Collomatic 65/2 K-3 [Fig.3.5], se toman cubos de 65 litros, para la creación de un mortero homogéneo. La máquina utiliza tres palas giratorias para realizar la combinación de los materiales, una de estas tiene una velocidad de 770 rpm mientras las dos restantes 150 rpm (Collepari, 2003).

⁴ La cantidad se presenta de forma representativa, como guía para el lector, pues la cantidad real a utilizar es la necesaria para satisfacer el experimento.

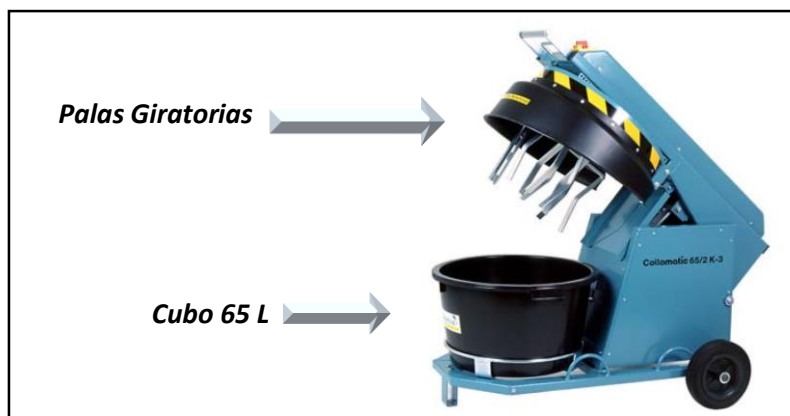


Figura 3.5 Equipo de mezclado Collomatic 65/2 K-3 (Collomix, 2010).

Se debe recordar que el acelerante es agregado en la boquilla de la pistola de proyectado, no en el proceso de mezclado. La cantidad de mortero por mezclado es de 35 L, con el propósito de obtener una mezcla homogénea, además de respetar la capacidad óptima del equipo. El proceso de mezclado es el mismo para ambos tipos de cemento y se realiza bajo la norma UNE-EN 196-3: 2005 descrito a continuación:

- Se deposita el agua en el contenedor luego se añade el cemento y el súper-plastificante, mezclándose por aproximadamente 4 minutos.
- Se adiciona la arena de forma lenta, con el equipo encendido, durante 5 minutos.
- Se deja reposar durante 60 segundos, y se limpian las palas del equipo
- Se transportan las mezclas al área de proyección

3.3.4 Cámara climática para proyecciones.

Las proyecciones han de ser realizadas en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña. Donde se ha construido una cámara con el objetivo principal de realizar proyecciones y las primeras 24 horas de curado [Fig. 3.6].



Figura 3.6 Cámara climática para proyección⁵

La estructura cuenta con un área de 7.3 m², sus paredes internas poseen planchas de polietileno expandido con un espesor de 20 cm, las cuales actúan como aislante térmico [Fig. 3.6]. Esto reduce la influencia provocada por variaciones de temperatura. Las proyecciones deben poseer condiciones ambientales controladas con una temperatura de 20° C y una humedad relativa de 90 %, con el

⁵ La caseta fue construida por postulantes de máster y doctorado de años anteriores a esta investigación

propósito de simular las condiciones de proyección en campo. El acondicionamiento del área de proyección consiste en la correcta colocación de una lona plástica resistente en el interior [Fig. 3.6 y Fig. 3.8] y exterior de la cámara [Fig. 3.10]. La colocación de lonas se realiza para que la limpieza del material derramado al concluir la proyección sea más rápida y eficiente.

3.3.5 Artesas y su posicionamiento para proyección.

El hormigón proyectado se deposita sobre artesas metálicas [Fig. 3.7 y Fig. 3.8] de un espesor de aproximadamente 4 mm. Las artesas [Fig. 3.6] deben cumplir las indicaciones de la UNE-EN14488, de estas se realiza la extracción de probetas testigo a utilizar en los ensayos.

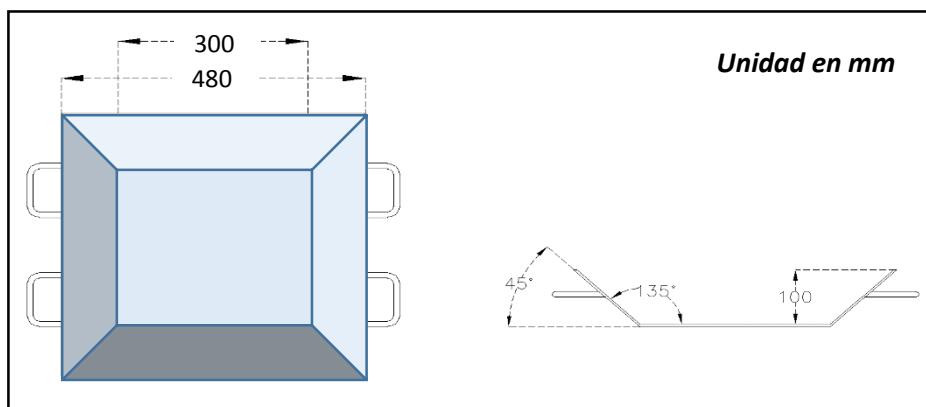


Figura 3.7 Dimensiones de artesa

Las artesas deben ser posicionadas de forma que la superficie a proyectar tenga un ángulo de 20° con respecto al plano vertical [Fig. 3.8]. El interior de estas es cubierto con desenconfrante para facilitar la extracción del material proyectado.



Figura 3.8 Colocación de artesas para proyectado

3.3.6 Equipos de proyección y su organización.

La figura 3.9 proporciona una esquematización didáctica del armado del equipo de proyección. En la misma se pueden observar las líneas de flujo tanto de presión de aire entre equipos adyacentes. También se observan las vías de inserción, de aditivos, material a ser proyectado y presión a utilizar desde cada equipo correspondiente a la pistola de proyección.

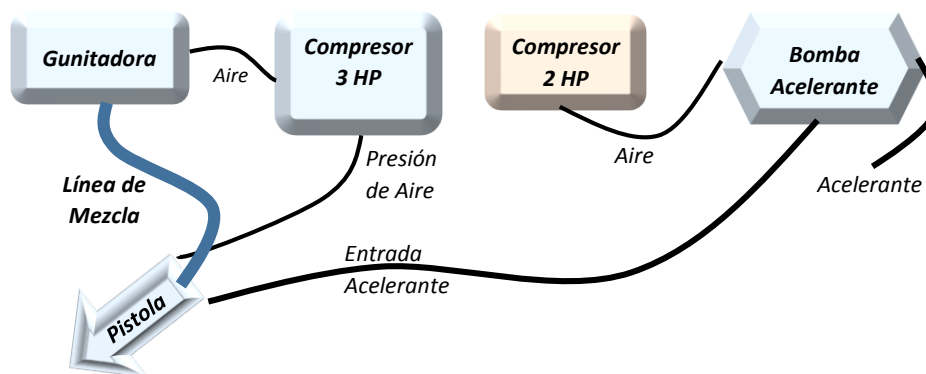


Figura 3.9 Esquema de conexión de equipo de proyección

El equipo de proyección para ejecutar la campaña experimental está compuesto, por una gunitadora dos compresores, una bomba para insertar el acelerantes y la pistola de proyección, todo este equipo con sus mangueras de presión de aire y acelerantes [Fig. 3.10].

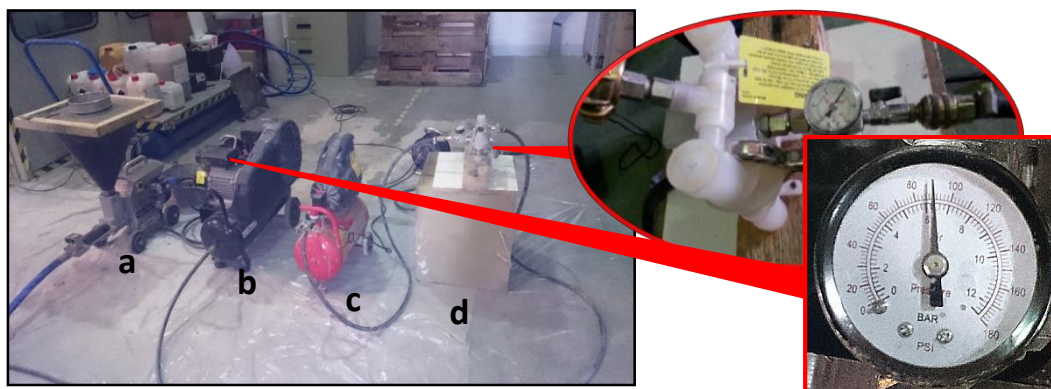


Figura 3.10 Organización y armado de equipo de proyección

La gunitadora es modelo UP-Pictor de la empresa UBIP SL. En la figura 3.10 de izquierda a derecha, se observa: a) la gunitadora; b) un compresor de 3 HP; c) un compresor de 2 HP; c) la bomba para el acelerante. Sobre la gunitadora se aprecian tamices que sirven para el colado del mortero a proyectar. Dicho equipo se opera por medio de un tornillo sin fin helicoidal por el cual circula la mezcla. Este conducto posee un medidor de presión el cual se conecta con el inicio de la “línea de mezcla” [Fig. 3.9 y 3.10] el cual siempre debe ser observado. Se resalta que el compresor más potente (3 HP) es el que brinda la presión para el proyectado cuyo valor es de 6 Bars [Fig. 3.10], con mangueras con un diámetro de 40 mm. El uso del otro compresor (2 HP) es alimentar una bomba de material plástico con un doble diafragma para dosificar el acelerante. La bomba es modelo P.025 de la empresa Wilden, cuya presión también es 6 bar [Fig. 3.10]

La pistola de proyección [Fig. 3.11] es la salida y zona de ligado de la mezcla y el acelerante. La figura 3.11 muestra la pistola de proyección antes y después del armado, asimismo presenta dos boquillas distintas las cuales fueron diseñadas exclusivamente para análisis en la UPC. La boquilla larga [Fig. 3.11a] se usa para proyecciones de pastas de cemento, posee un diámetro de 6 mm y 30 mm de longitud. Mientras la boquilla corta [Fig. 3.11b] posee un diámetro de 8 mm sin alargamiento longitudinal y se utiliza para la proyección de morteros homogéneos.



Figura 3.11 Pistola de proyección; a) Desarmada y con boquilla de pastas b) Armada y con boquilla de morteros

La pistola posee tres entradas distintas (por diámetros) [Fig. 3.11]; la entrada principal [línea azul Fig. 3.9] es la matriz cementícea, la segunda entrada es del acelerantes y la última es para la adición de la presión de aire. Las funciones de la presión de aire es homogeneizar la matriz cementícea con el acelerante y ofrecer la potencia de proyección.

3.3.7 Ejecución de proyección por vía húmeda.

Previo a la proyección se deben comprobar el flujo de todos sus elementos, es decir que la conducción de presión de aire, acelerantes y mortero fluya sin problemas. Por lo tanto, la presión del sistema debe ser constante (6 bar), igualmente procurar que la boquilla de la pistola no se encuentre obstruida. Se debe contar con un personal experimentado, pues el proceso de proyección es dependiente del operador que la efectúa [Fig. 3.12].

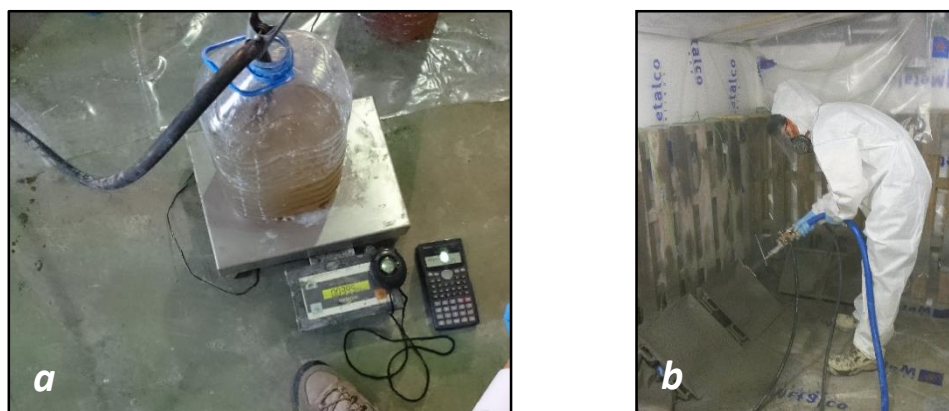


Figura 3.12 a) Flujo de volumen de acelerantes b) Acción de proyectado

El operador debe siempre considerar, la distancia y el ángulo de proyección [Fig. 3.12b], para que las muestras sean lo más uniformes posible. En el proceso de proyectado la dosificación del acelerantes se controla midiendo el peso del acelerante por el tiempo, utilizando una balanza de precisión Sartorius [Fig. 3.12a.].

3.3.8 Almacenamiento de muestras luego de proyección.

En las primeras 24 horas no se aplica ningún aditivo para el curado del mortero proyectado, para no contaminar las muestras y no comprometer su composición para los ensayos futuros. Durante este tiempo las muestras deben ser almacenadas en un espacio controlado. Se reutiliza la cámara climática para su almacenamiento [Sec. 3.3.4], donde la humedad es controlada por un aire acondicionado móvil a 20° C, mientras la humedad relativa es de 90 % controlada por un humidificador de la marca Orbegozo modelo HU 2033 [Fig.3.13].

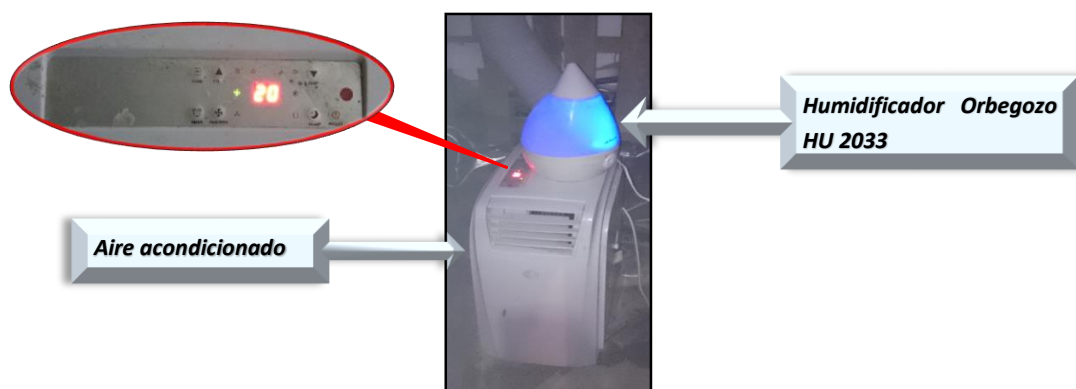


Figura 3.13 Sistema de temperatura y humedad

3.3.9 Preparación, corte y extracción de probetas testigos.

Al concluir el ciclo de 24 horas de fraguado de los morteros proyectados se procede a la extracción del mortero de las artesas. Gracias a la utilización del desencofrante el bloque de mortero es extraído de forma fácil e intacta. Seguida de la extracción inmediatamente se procede al corte de las probetas testigos, para luego ser sumergidas en agua para la saturación hasta 7 y 28 días en el interior de una cámara húmeda.

El proceso de obtención de las probetas es descrito en la figura 3.14, donde: Primero se observa el bloque de concreto desencofrado [Fig. 3.14a]; Luego se observa el corte de las alas del bloque, debido a su forma irregular, pues no proporcionan las dimensiones para la obtención prismática de los testigos [Fig. 3.14b]; por último, se presenta la obtención de las probetas testigo [Fig. 3.14c].

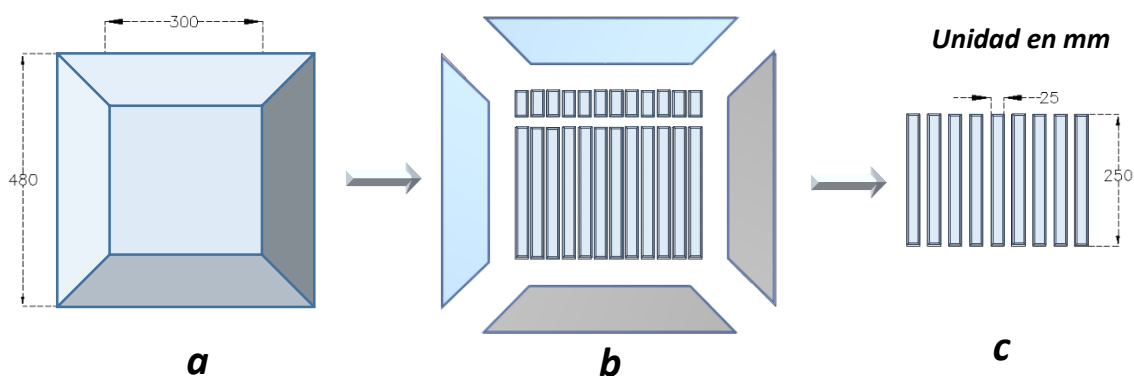


Figura 3.14 Esquema de diseño de Probetas Testigo

Como el bloque de hormigón posee la forma de las artesas, para obtener las probetas testigo es necesario cortarlo. Para realizar los cortes en el bloque de concreto se utiliza una cortadora de disco radial [Fig. 3.15a]. Conjuntamente se utiliza un pie de rey para medir todas las caras del prisma de la probeta, lo que permite obtener una mayor precisión en cuanto a las dimensiones de cada probeta [Fig. 3.15b].



Figura 3.15 a) Cortadora de disco radial (J. Galobardes Reyes, 2011). b) Probetas testigo.

El producto son muestras de mortero prismático, las dimensiones de estas probetas son 25 x 25 x 250 mm [Fig. 3.14c] a diferencia de las utilizadas en la norma que poseen una longitud de 285 mm. Se puede apreciar que las dimensiones útiles del bloque de mortero son 300 x 300 mm [Fig. 3.14a], y que la dimensión más larga del prisma es de 250 mm [Fig. 3.14c] por lo que hay un restante longitudinal de 50 mm. En función de las dimensiones del bloque y el ancho de las probetas se pueden obtener un máximo de 12 testigos [Fig. 3.14b]. Para fines investigativos y como margen de error solo se seleccionan 9 probetas [Fig. 3.14c], los trozos sobrantes de 50 mm se utilizan para ensayos de porosidad.

Familias	Edades	Cementos	Acelerantes y Dosis	Probetas-testigo	Nomenclatura
Mortero I	7 días	CEM I 52.5 R	AF1_5 %	1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, 1X, 1Y, 1Z	CIAF1_5%_7D
Mortero II	28 días	CEM I 52.5 R	AF1_5 %	1AA, 1BB, 1CC, 1DD, 1EE, 1FF	CIAF1_5%_28D
Mortero III	7 días	CEM I 52.5 R	AF1_7 %	2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F, 2X, 2Y, 2Z,	CIAF1_7%_7D
Mortero IV	28 días	CEM I 52.5 R	AF1_7 %	2AA, 2BB, 2CC, 2DD, 2EE, 2FF	CIAF1_7%_28D
Mortero V	7 días	CEM I 52.5 R	AF2_5 %	3A, 3B, 3C, 3D, 3E, 3F, 3X, 3Y, 3Z	CIAF2_5%_7D
Mortero VI	28 días	CEM I 52.5 R	AF2_5 %	3AA, 3BB, 3CC, 3DD, 3EE, 3FF	CIAF2_5%_28D
Mortero VII	7 días	CEM I 52.5 R	AR1_3 %	4A, 4B, 4C, 4D, 4E, 4F, 4X, 4Y, 4Z	CIAR1_3%_7D
Mortero VIII	28 días	CEM I 52.5 R	AR1_3 %	4A, 4B, 4C, 4D, 4E, 4F, 4X, 4Y, 4Z	CIAR1_3%_28D
Mortero IX	7 días	CEM I 52.5 R	AR2_3 %	5A, 5B, 5C, 5D, 5E, 5F, 5X, 5Y, 5Z	CIAR2_3%_7D
Mortero X	28 días	CEM I 52.5 R	AR2_3 %	5AA, 5BB, 5CC, 5DD, 5EE, 5FF	CIAR2_3%_28D
Mortero XI	7 días	CEM II A-L 42.5 R	AR2_3 %	6A, 6B, 6C, 6D, 6E, 6F, 6X, 6Y, 6Z	CIIAR2_3%_7D
Mortero XII	28 días	CEM II A-L 42.5 R	AR2_3 %	6AA, 6BB, 6CC, 6DD, 6EE, 6FF	CIIAR2_3%_28D
Mortero XIII	7 días	CEM II A-L 42.5 R	AF1_5 %	7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F, 7X, 7Y, 7Z	CIIAF1_5%_7D
Mortero XIV	28 días	CEM II A-L 42.5 R	AF1_5 %	7AA, 7BB, 7CC, 7DD, 7EE, 7FF	CIIAF1_5%_28D
Mortero XV	7 días	CEM II A-L 42.5 R	Referencia	8A, 8B, 8C, 8D, 8E, 8F, 8X, 8Y, 8Z	CII_7D
Mortero XVI	28 días	CEM II A-L 42.5 R	Referencia	8AA, 8BB, 8CC, 8DD, 8EE, 8FF	CII_28D
Mortero XVII	7 días	CEM I 52.5 R	Referencia	9A, 9B, 9C, 9D, 9E, 9F, 9X, 9Y, 9Z	CI_7D
Mortero XVIII	28 días	CEM I 52.5 R	Referencia	9AA, 9BB, 9CC, 9DD, 9EE, 9FF	CI_28D

Tabla 3.7 Desarrollo logístico de obtención de probetas

La tabla 3.7 muestra el desarrollo logístico para la creación de probetas testigo. Se puede observar en la última columna la cantidad de probetas que se utilizan, con un nombre referencial, en función de las características antes descritas. Se analizan un total de 126 probetas testigo, donde 84 son CEM I y 42 de CEM II. De las 84 probetas de CEM I, 54 poseen una edad de exposición a 7 días, mientras los 30 restantes son de 28 días. De igual modo de las 42 de CEM II, 27 poseen una edad de exposición a 7 días y los 15 restantes son de 28 días. Las últimas 4 familias de probetas no poseen acelerantes, por lo que no son proyectadas, estas actúan como referencia para los análisis que se deban llevar a cabo.

3.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS BÁSICAS Y MECÁNICAS.

En esta etapa del estudio se analizan las características básicas de las muestras. Aun cuando autores describen la resistencia a compresión como inapropiada para analizar la durabilidad (Skalny et al., 2002), es un estudio que no debe faltar en la evaluación del comportamiento de las mezclas cementíceas. En cuanto a la porosidad, este es uno de los aspectos principales afectados por las técnicas de proyección y puede contribuir al ASE acelerado [Sec. 2.8.2].

3.4.1 Ensayo de porosidad.

La porosidad se mide de acuerdo a la norma (ASTM C 642, 2006) (Jolin, Melo, Bissonnette, Power, & Demmard, 2015). Las muestras de mortero (25x25x50 mm) fueron sumergidas en agua durante 7 y 28 días, posteriormente se toma su peso hidrostático, seguido de su peso en condición saturada. Seguido las muestras se introducen en un horno a una temperatura de 100 - 110° C por un tiempo no menor a 24 horas, luego se deja enfriar a una temperatura de 20 - 25 °C para obtener su peso seco.

3.4.2 Ensayo de resistencia a compresión.

El ensayo para establecer la resistencia a compresión de probetas de mortero proyectado se realizó de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1:2005 " Métodos de ensayos en cementos. Determinación de la Resistencia Mecánica (Aenor, 2005). Previo a su ejecución, deben ser obtenidos los testigos a ensaya, por lo que primero se describe la forma de obtención de los especímenes y equipos a utilizar.

3.4.2.1 Equipos.

Para extracción de testigos.

Para la extracción de testigos se ha utilizar el Taladro Hilti DD200 con una Broca corona diamante DD-B 25/320 HWC, de 25 mm de diámetro nominal [Fig. 3.16]. Este es utilizado regularmente para la extracción de testigos en este tipo de ensayos.



Figura 3.16 Taladro Hilti DD200

Para obtención de resistencia a la compresión.

La determinación de la resistencia a compresión se realiza con el equipo Iberetest modelo MEH-300 con Autotest-200/10 [Fig. 3.17]. Esta posee tres módulos de trabajo o prensas cuya fuerza hidráulica se localiza en el interior de un armario metálico, bajo el ordenador de control. Este equipo puede

realizar diferentes tipologías de ensayo: tracción indirecta, flexotracción, módulo elástico, módulo de compresión y flexión de mortero (L. de tecnología d'estructures UPC, 2006)



Figura 3.17 Iberetest modelo MEH-300 (W. UPC, 2015)

3.4.2.2 Extracción y normalización de testigos.

Los testigos serán extraídos de las artesas previamente desmoldadas. El proceso de extracción de testigos inicia con la colocación del bloque de mortero proyectado en la base del equipo, asegurando que permanezca inmóvil. Se utiliza una broca de 25 mm para obtener los testigos [Fig. 3.16]. Al penetrar el bloque con el taladro se obtienen los testigos, se debe asegurar un flujo constante de agua para no atascar la broca. Los testigos han de ser extraídos del centro del bloque y no de las alas, dejando una distancia entre extracciones de ± 4 cm [Fig. 18a].

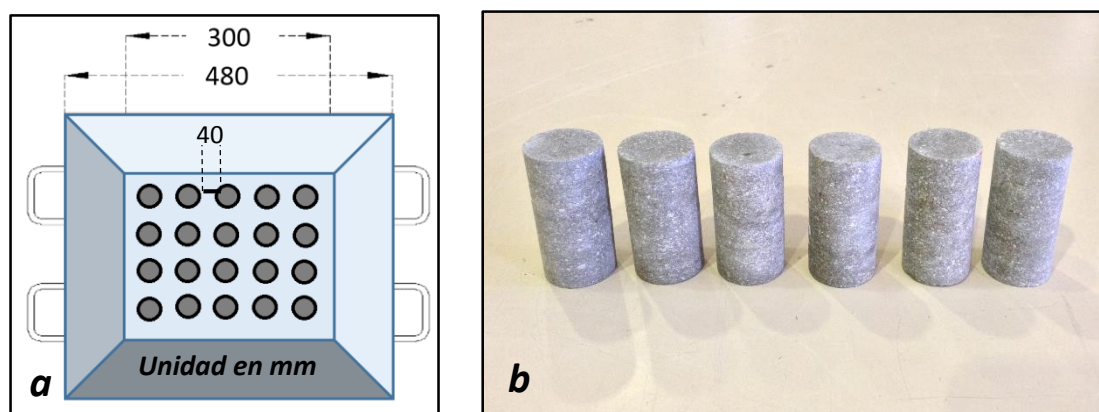


Figura 3.18 a) Esquema de Extracción de Testigos b) Testigos de 25x50 mm

Posterior a la extracción, la dimensión de los testigos debe ser normalizadas para conseguir cumplir la longitud de 50 mm [Fig. 18b]. Esta longitud produce una esbeltez igual a 2, lo que elimina las correcciones por esbeltez (BS 1881, 1983). La cortadora de disco radial [Fig. 3.15a] se ha de utilizar para corregir las irregularidades en la longitud y cara de los testigos. Todos los testigos deben ser medidos y pesados para comprobar sus condiciones físicas.

3.4.2.3 Logísticas de ensayo a compresión.

Para cada tipo de muestra se deben someter al ensayo 6 testigos cilíndricos de 25 X 50 mm [Fig. 3.18b]. Se ha de determinar la resistencia a compresión en los tiempos de 1 días, 3 días, 7 días 28 días y 90 días, pero se priorizan las que coinciden con el experimento (7 y 28). El equipo Iberetest [Fig. 3.17] ha de ser configurado como ensayo a la compresión, ajustándose la velocidad de ensayo en 60 mm/min

y la de aproximación a 25 mm/min [Fig.3.19a]. Una vez se inicia el ensayo se debe prestar atención, los datos automáticamente inician su registro en el momento que la probeta entra en contacto con el brazo de presión [Fig.3.19b] y debe ser detenido al momento de rotura del testigo [Fig. 3.19c].

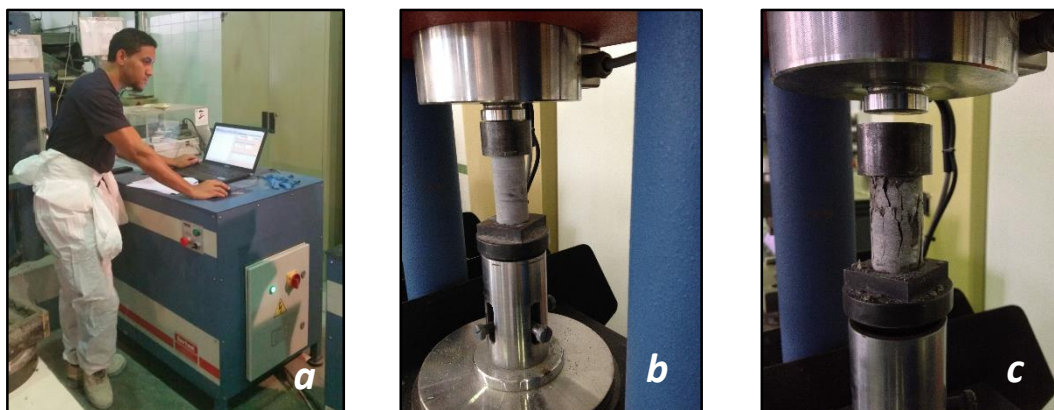


Figura 3.19 Ensayo de compresión: a) Control de equipo b) Colocación de testigo c) Rotura de testigo

3.5 EXPOSICIÓN DE MUESTRAS AL ASE ACELERADO Y LOGÍSTICA DE CONTROL.

El desarrollo sistemático del experimento, se fundamenta principalmente en la inmersión de las muestras en una solución con sulfato y la observación de su cambio volumétrico. Los ensayos restantes son utilizados para corroborar los resultados y observar el comportamiento químico de las probetas.

3.5.1 Materiales.

En esta etapa es de vital importancia conocer de forma meticulosa los materiales empleados en los ensayos. Esto se debe a que las muestras son sometidas a procesos químicos delicados, por lo que se debe cuidar la integridad del experimento. El agua a utilizar será potable limpia e integra.

La solución de exposición estándar utilizada por la norma ASTM C-1012 04 contiene 352 moles de Na_2SO_4 por m^3 . Por lo que la solución utilizada en el experimento es Na_2SO_4 [Tabla 3.8], esto se debe a que otras concentraciones de sulfato u otros sulfatos como el MgSO_4 se utilizan para simular la exposición a ambientes de interés específico (ASTM C1012, 2004). La norma ASTM C-1012 04 establece que la proporción de Na_2SO_4 por probetas de mortero en un envase que contenga al menos 4 ± 0.5 del volumen de la solución en función del volumen de 1 probeta. Para las probetas de la norma ASTM C-1012 04 que son de 25 x 25 x 285 (volumen de 178 mL), la solución tiene un rango de 625 – 800 mL por cada barra de mortero. Para el experimento los testigos son de 25 x 25 x 250 (volumen de 156 mL), por lo que el volumen de solución tendría un rango de 546 – 702 mL por probeta en el recipiente de almacenamiento. No obstante, el contenido de sulfatos que se utiliza es en función del volumen de agua en el que se sumergen las muestras siendo de 30 g/L de Na_2SO_4 (3 % o 30034.27 Ppm), avalado por distintos autores (Glasser et al., 2008; Lipus & Puntke, 1996; Matschei & Glasser, 2008; Mielich & Ötll, 2004; Mulenga, Stark, & Nobst, 1999; Rozière et al., 2009; Schmidt, 2007; Tittelboom et al., 2013; Wittekindt, 1960).

Grado	Reactivo ACS
	anhídrido
Pureza (Titulación por NaOH)	≥99.0%
Apariencia (color)	blanco
Apariencia (forma)	polvo
Impurezas	≤0.01% insolubles
	≤5 ppm compuestos de Nitrógeno (N)
Perdida	≤0.5% pérdidas por ignición
Rango de pH	5.2 - 9.2 a 50 g/l a 20 °C
Punto de fusión	884 °C (lit.)
Densidad	2.68 g/mL a 25 °C (lit.)
Rastros de Aniones	Cloruro (Cl ⁻): ≤0.001%
	Fosfato(PO ₄ ³⁻): ≤0.001%
Rastros de Cationes	Calcio (Ca): ≤0.01%
	Hierro (Fe): ≤0.001%
	Potasio (K): ≤0.002%
	Magnesio (Mg): ≤0.001%
	Metales pesados: ≤5 ppm

Tabla 3.8 Características del Sulfato de Sodio (SIGMA-ALDRICH, 2015a, 2015b)

3.5.2 Inmersión de muestras en soluciones.

Las probetas del experimento han de ser posicionadas de forma vertical dentro de un recipiente plástico [Fig.3.20], con una malla en el fondo del mismo que permita una interacción homogénea entre la muestra y la solución. Se diseña una base soporte de plástico [Fig. 3.20] para la colocación de las probetas dentro del envase, sin que estas entre en contacto entre ellas. La distribución de las probetas se planifica para que el ASE sea en las 4 caras del prisma. De las familias de muestra [Tabla 3.7], los especímenes X, Y, Z son colocadas en agua potable y los restantes en la solución de sulfatos.

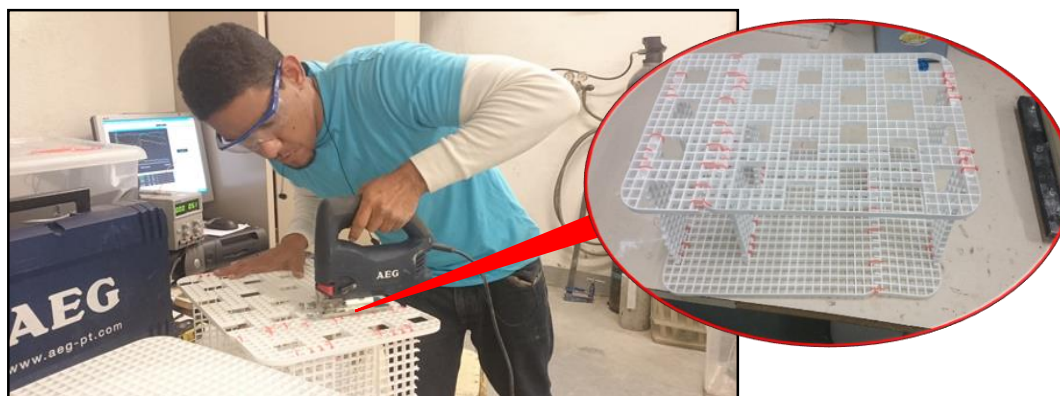


Figura 3.20 Diseño de base para probetas

El embace de acopio de dichas probetas tendrá un volumen máximo aproximado de 50 litros con una temperatura controlada de 23 ± 2.0 °C (ASTM C1012, 2004). Para este modelo de experimentación la solución tendrá un flujo continuo, impulsado por una bomba de agua sumergible o bomba de acuario [Fig. 3.21]. Esta característica del experimenta brinda una mayor similitud sobre el movimiento de fluidos en condiciones reales (Neville, 2004). Además, se aplica una capa de pegamento X60 [Anejo B3] en los bordes extremos opuestos de la dimensión larga de cada probeta [Fig. 3.21]. Esto con el propósito de impermeabilizar estas caras y el ataque se concentre en toda la longitud del prisma



Figura 3.21 Probetas de mortero inmersas en sulfatos

Para las muestras sumergidas tanto en agua como en sulfatos la temperatura es controlada debido que al igual que sucede con cualquier reacción química, la velocidad de la reacción se incrementa con la temperatura (Garzón Pire, 2013). Las soluciones donde se sumergen las muestras debe ser reemplazada en función al pH que presente [Sec. 3.5.3].

3.5.3 Ensayo de control por pH.

Los ensayos de PH son la forma de control y cambio de la solución, la cual se renueva cuando el pH sea mayor de 10 pero menor que 11. En condiciones reales el flujo es continuo y pocas veces ocurre un estancamiento que permita sobrepasar este nivel de pH. Asimismo la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el C-S-H comienzan a disolverse en $\text{pH} < 12.5$ (Harris, Manning, Tearle, & Tweed, 2002; Taylor, 1997).



Figura 3.22 pH-metro CRISON (CRISON, 2008)

Las medidas en un inicio han de realizarse dos veces por semana, luego una vez por semana y finalmente cada 15 días. Para esto se utiliza un pH-metro modelo CRISON [Fig. 3.22], el cual debe ser calibrado [Anejo B8] cuando sea utilizado. Las condiciones ambientales para su uso deben encontrarse entre $5 - 40^\circ\text{C}$, con esto claro se pueden tomar las medidas de pH [proceso de medición anejo B9].

3.6 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MUESTRAS FRENTE AL ASE.

La evaluación del comportamiento físico y químico de las muestras ha de ser observado con las técnicas descritas en este apartado. Por lo que la observación del efecto que tienen los sulfatos en los morteros proyectados, se ha de analizar a nivel macroscópico y microscópico. Los datos de cada ensayo han de ser colectados una vez por semana durante el primer mes y luego de forma quincenal.

3.6.1 Inspección visual.

Cada muestra de mortero prismático pertenecientes a las diferentes familias expuestas tanto a la solución de Na_2SO_4 como en H_2O han de ser examinadas detenidamente para comprobar cualquier deterioro visible en su superficie. Asimismo, dichos daños en la superficie de los especímenes han de ser registrados de manera fotográfica [Fig.3.23].



Figura 3.23 Inspección visual de espécimen

Al momento de realizar el seguimiento visual, las muestras han de estar fuera del agua solo al momento de tomar la fotografía e inmediatamente retornar a la solución. Para que los daños sean apreciables se puede remover la humedad en la superficie de las probetas, así esta humedad no afecta el análisis de resultados.

3.6.2 Ensayo de estabilidad dimensional o expansión lineal.

La evaluación dimensional o expansión lineal de mezclas proyectadas no posee una normativa establecida, por lo que el proceso utilizado en este apartado es una combinación entre la norma (ASTM C1012, 2004) y el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

3.6.2.1 Equipo para Medición.

Para obtener la variación longitudinal de las probetas, se utiliza el extensómetro DEMEC con una exactitud de medida de 150 μm . El modelo es el indicador de tensión digital DEMEC [Fig. 3.24], el cual posee un indicador digital Mitutoyo Absolute modelo ID-C [Anejo B4] con precisión de 0.001 mm. Con este se pueden tomar medidas de deformación de diferentes puntos con un solo instrumento.



Figura 3.24 Reloj Comparador, extensómetro, micrómetro o indicador de tensión mecánica DEMEC

El indicador consiste en un haz principal invar con dos puntos de localización cónicos, uno fijo y el otro gira en un borde especial tipo cuchillo. Los discos o puntos de localización de acero inoxidable [Fig. 3.25] adheridos a la estructura. El movimiento del punto de giro se obtiene por el medidor de deformación que está unido a una placa de base sobre la viga invar. El diseño es tal que el movimiento térmico dentro del instrumento es insignificante. El indicador muestra el movimiento del cabezal digitalmente por medio de un codificador lineal y tiene una velocidad de respuesta de 1,000 mm/s, el cual funciona con una batería (Mayers Group, 2009). Para medir la deformación se colocan en la muestra puntos o discos de localización del DEMEC [Fig. 3.25], utilizando la barra de ajuste 150 mm, estos se adhieren utilizando el pegamento X60 [Anejo B3].

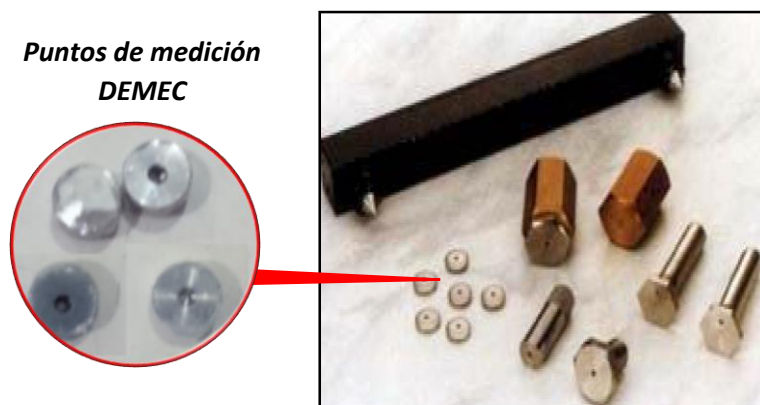


Figura 3.25 Accesorios de medición DEMEC (Mayers Group, 2009)

3.6.2.2 Evaluación dimensional producto del ASE acelerado.

El cambio longitudinal de las probetas se medirá utilizando el reloj comparador DEMEC [Fig. 3.26]. Para esto las muestras se extraen de la solución, teniendo en cuenta que no debe exponerse a ciclos mojado – secado. Pues favorecer a un deterioro acelerado por condiciones distintas al ASE acelerado. La primera lectura se realiza antes de colocar las muestras en sulfatos. Las medidas se realizan semanalmente durante el primer mes, posterior a esto cada 15 días.



Figura 3.26 Proceso de Medición de Expansiones con el DEMEC

3.6.3 Ensayo de ultrasonidos o velocidad de pulso ultrasónico.

Es un método no destructivo, económico y sencillo el cual consiste en la medición de la velocidad de propagación de las ondas y la correlación con la distancia. Esta velocidad está determinada por la densidad de los materiales, la resistencia mecánica, discontinuidades, existencia de grietas, fisuras o coqueras, las propiedades dinámicas del hormigón, medida a través del tiempo que tarda en

transmitirse la onda entre dos puntos a una distancia determinada. Para su interpretación se tiene en cuenta que los valores más altos de velocidad, determinan una mayor densidad y compacidad del material. Para el caso que compete a esta experimentación interesa percibir la creación de fisuras o grietas producto de tensiones internas en las muestras debido al ASE.

3.6.3.1 Equipo de medición.

Se utiliza el Pundit PL-200 [Fig. 3.27] un instrumento de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (UPV). El equipo se ha diseñado para ser utilizado en el campo, es un equipo portátil y simple de utilizar. El dispositivo tiene una batería de carga lo que permite que funcione sin estar conectado a una fuente de corriente directa. El equipo debe ser correctamente calibrado [Anejo B5] previo a ser utilizado. El mismo viene conformado por: A) Pantalla táctil Pundit; B) Batería; C) 2 transductores 500 kHz [Anejo B6]; D) Acoplador; E) Cilindro de calibración; F) BNC Cable adaptador; G) 2 BNC Cables 1,5 m; H) Fuente de alimentación y; I) Cable USB.

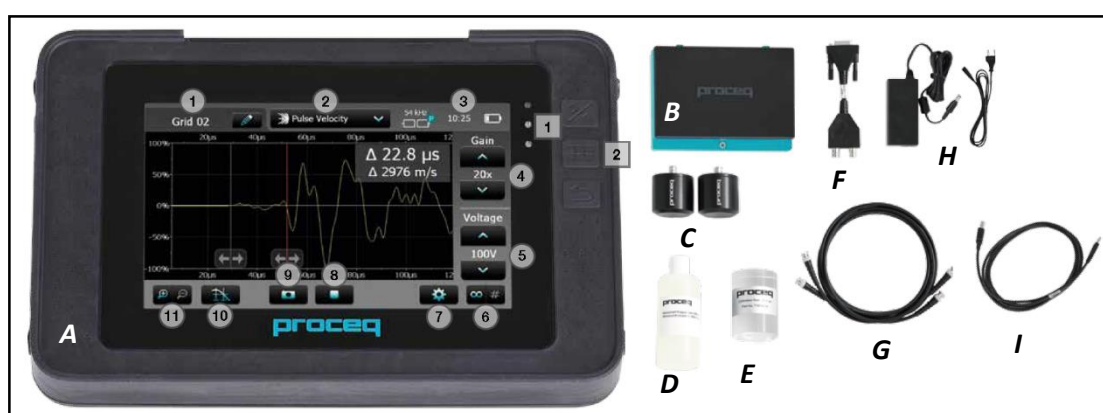


Figura 3.27 Equipo de ensayos ultrasónicos Pundit PL-200 (Proceq SA, 2014)

3.6.3.2 Logística de medida de velocidad de onda.

El proceso del uso del equipo y obtención de datos viene orientado por la norma UNE-EN-12504-4. Para obtener la data hay tres formas de ordenar los transductores; de forma directa, de forma indirecta y de forma semi-directa.

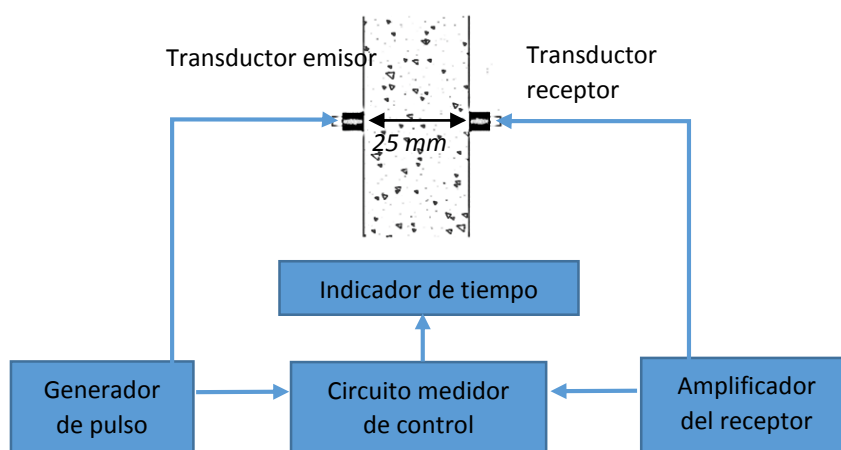


Figura 3.28 Diagrama de transmisión directa

Para el análisis se utiliza la configuración de transmisión directa [Fig. 3.28], por ser la configuración óptima y con la máxima amplitud de señal. Es el método más exacto para determinar la velocidad de pulso. En este la longitud de trayectoria se mide de centro a centro de los transductores (Proceq SA, 2014).



Figura 3.29 Proceso de obtención de tiempo de transmisión de onda ultrasónica

Es esencial en todas las pruebas de impulsos ultrasónicos [Fig. 3.29] utilizar algún tipo de acoplador (en este caso gel) entre los transductores y el material que se analiza. De no hacerlo, dará lugar a una pérdida de señal debido a acoplamiento acústico insuficiente. El acoplador de ultrasonido siempre ofrece un buen acoplamiento cuando se utiliza en materiales de concreto u otros que tienen superficies lisas. Asimismo, se conoce que la velocidad de propagación del sonido en el mortero se incrementa proporcional a su contenido de humedad.

3.6.3.3 Interpretación de datos.

El resultado buscado es la velocidad de pulso en los elementos sometidos al análisis. Esta velocidad se obtiene mediante la siguiente expresión según las normas EN 1204-4 y NTG 41017 h17 (AENOR, 2006; COGUANOR, 2012);

$$\text{Velocidad de pulso (V)} = \frac{\text{Distancia entre transductores (L)}}{\text{Tiempo de transmisión (t)}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

3.6.4 Difracción de rayos-X (DRX).

La DRX identifica las fases cristalinas de una muestra con un elevado grado de certidumbre, al punto de que el espectro de DRX es único para cada material. Al mismo tiempo suministra información adicional como parámetros de red, orientación cristalina, tamaño de cristal, nivel de esfuerzos residuales, entre otras [Anejo A4]. El equipo a utilizar para el análisis es un difractómetro de geometría Bragg-Brentano PANalytical X'Pert PRO MPD theta/theta propiedad de la Universidad de Barcelona (UB).

El laboratorio de la UB brinda el servicio científico y técnico del ensayo por lo que controlan los parámetros del ensayo [Tabla 3.9]. Por ende, proporcionan los resultados en forma de difractograma, de donde se analiza la fase cristalina de las muestras y se identifican utilizando el software especial X'Pert Highscore Plus versión v3.0, cuya actualización data del 2012.

Componentes del ensayo	Característica
Difractómetro	PANalytical XPert PRO MPD θ/θ
Detector	PIXcel
Patrón interno	TiO ₂ PA (rutilo) 10 % en masa
Diámetro de la muestra	27 mm
Radiación	CuK α ($\lambda = 1,54186\text{\AA}$)
Voltaje tubo	40 o 45 kV
Corriente tubo	40 mA
Spinner	2 revoluciones / s
Soller slit	0.04 rad
Divergence slit	1/2°
Antiscattering slit	1°
Ángulo de take off	6°
Ángulo inicial	5° 2 θ
Ángulo final	70° 2 θ
Paso angular	0,02° 2 θ
Tiempo paso angular	20 s

Tabla 3.9 Parámetros de DRX

3.6.4.1 Preparación de muestras para DRX.

En función de que el análisis de DRX se realiza por un laboratorio contratado, se especifica la correcta preparación de las muestras para ser sometidas al ensayo [Fig. 3.30].

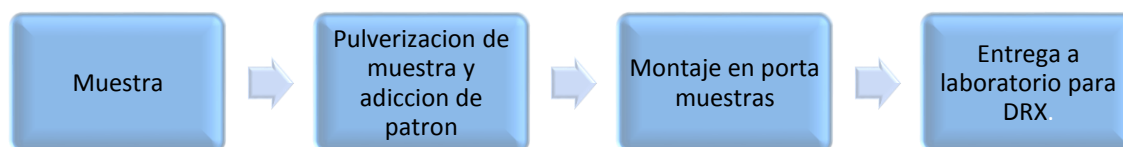


Figura 3.30 Diagrama de flujo de preparación de muestra para DRX

Pulverización de muestras y adición de patrón para DRX.

Se utiliza un patrón de Rutilo de Dióxido de Titanio (TiO₂) con una pureza de 99.99 % según la empresa productora SIGMA-ALDRICH. Dicho patrón se utiliza para comparar las muestras con los patrones de difracción de rayos X para identificar las fases en cada muestra. El proceso a seguir para pasar la muestra de un estado compactado a uno polvoriento es descrito a continuación:

- Se inicia con el corte de las probetas en láminas de aproximadamente 2 mm de espesor utilizando una cortadora de disco radial [Fig. 3.15a];
- Se utiliza un mortero de ágata [Anejo B7 Fig. VI b] para moler la muestra hasta convertirlas básicamente en polvo homogéneo que pasa por un Tamiz de 63 μm .
- Las muestras son pesadas utilizando una balanza analítica scaltec SPB 32 [Anejo B7 Fig. VI a] para extraer la cantidad de muestra que se necesita para el ensayo (3 gramos).
- Se pesa 10 % del patrón de TiO₂ [Tabla 3.9] en relación a la masa de la muestra pulverizada.
- Se realiza la mezcla de la muestra con el patrón en el mortero de ágata, la muestra debe quedar completamente homogénea sin pigmentos blancos o grisáceos [Anejo B7 Fig. VI b].
- Luego se almacenan las muestras en un frigorífico (30°C) hasta el momento de realizar el DRX.
- Llegado el momento se trasladan las muestras al laboratorio de la UB donde se colocarán las muestras en el porta muestras [Anejo B7 Fig. VII] y luego se efectúa la DRX [colocación de muestra Anejo B7].

4 CAPITULO.

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 PREÁMBULO.

En este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos en el programa experimental de la investigación en función de las variables descritas en el capítulo 3. Debido a la gran cantidad de muestras analizadas (126 probetas-testigo) se decide utilizar el criterio de Chauvenet [Anejo A5] para analizar los resultados. Los resultados estadísticos han de ser exhibidos en función de las familias de mortero y con la nomenclatura descritas anteriormente [Tabla 3.7].

El deterioro de las probetas de mortero se evaluó mediante el control de la apariencia visual, la expansión y la velocidad de ondas de ultrasonido. En conjunto también se mide la porosidad y resistencia a compresión de las muestras, además de realizar un seguimiento químico con la DRX. Este estudio es diferente de las pruebas estándar de ASTM porque el pH es controlado ($\text{pH} < 11$) y la concentración de la solución de sulfato se mantuvo durante todo el período de prueba (30 g/l), además de proporcionarse un flujo continuo de las soluciones (Monteiro, Roesler, Researcher, Kurtis, & Harvey, 2000).

4.2 POROSIDAD.

Las pruebas de porosidad se realizan en el Laboratorio de Química y Materiales de Construcción (UPC). Partiendo de las 18 familias de mortero proyectado se extrajeron valores promedio de la porosidad de cada grupo. Su resultado se representa en la Figura 4.1 donde las columnas de la izquierda poseen 7 días previo a la exposición y 28 en la derecha.

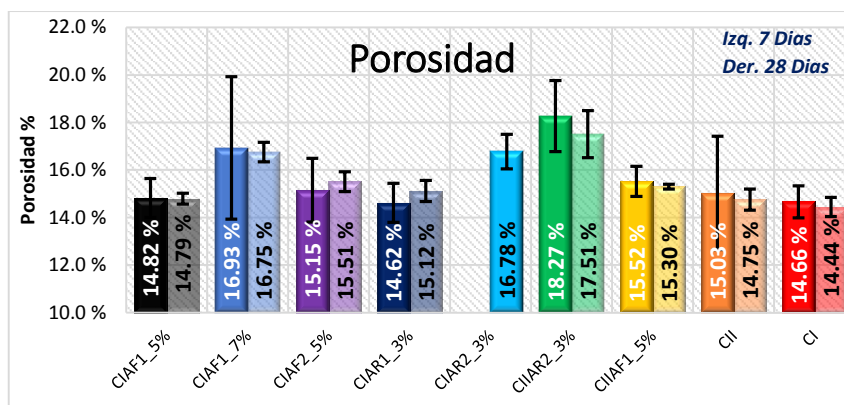


Figura 4.1 Pictograma de porosidad

Lo primero que se puede apreciar en la figura 4.1 es que el rango del porcentaje de porosidad de las 18 familias de mortero se encuentra dentro de rangos definidos por otros autores en la literatura, entre 15 – 20 % (Blanco Alvarez, n.d.; Issac Galobardes Reyes, 2009; J. Galobardes Reyes, 2011; Goodier, 2000; Jolin et al., 2015; Morgan, Neill, McAskill, & Duke, 1987).

En función a los valores medios, se tiende a tener inferior porosidad en muestras con 28 días previos a la exposición que, con muestras con 7 días previo a la exposición, si bien frente a la variabilidad que se produce no se puede resaltar un resultado conclusivo. Además, se observa que la variabilidad de la porosidad es más alta en las muestras expuestas al ASE acelerado luego de 7 días que en muestras expuestas luego de 28 días. Esta diferencia de porosidad en función al tiempo en que inicia la exposición puede ser debido a que un testigo con mayor edad tiene mayor estabilidad en su matriz cementícea. Conforme a que se van dando las reacciones de hidratación de las mezclas o conforme a pasa el tiempo, los huecos de la matriz cementícea se van llenando, por lo que puede reducirse un poco la porosidad y por ende se reducen las diferencias entre un testigo y otro en el tiempo. Por otro lado, todas las familias donde la porosidad fue menor en muestras de 7 días previos a la exposición están compuestas por CEM I (alto C₃A).

Cuando se compara la porosidad de los especímenes por tipo de cemento, nuevamente la variabilidad produce inseguridad en la veracidad de los resultados. Pero se observa que los CEM I, presentan menor variabilidad que los CEM II al igual que menor porosidad en ordenes entre 0.31 – 1.58 % de diferencia. Lo que puede indicar que las muestras con CEM I presentan mejor interacción entre los elementos que la componen.

En cuanto a los diferentes tipos de acelerantes y las muestras sin acelerantes las cuales no son proyectadas y sirven como referencia para el estudio, como era de esperarse dichas referencias presenta los porcentajes más bajos de porosidad. Las muestras sin acelerantes (CI, CII) tiene hasta 3 % menos porosidad que las mezclas con acelerantes, debido principalmente a que no se usa el sistema de proyección el cual añade aire a la mezcla. El 75 % de las muestras con AF presentan una porosidad aproximada de 15 %, esta es menor que en los AR donde su porosidad general supera el 16.50 %. Además, se observa que el intervalo de confianza en los AF es menor a 1.5 % mientras en los AR es superior a 1.5%. En base a esto se puede decir que los AF poseen mejor intención con las mezclas cementíceas, brindando mejor compactación. El mayor porcentaje de porosidad de los AR puede ser debido a que su fraguado es tan acelerado que interviene en el acomodamiento de los elementos que componen la mezcla cementícea provocando una interacción deficiente entre ellos.

Al comparar las familias con AF en distintas dosificaciones se observa una diferencia mayor de 1.90 % en la porosidad, con la menor dosifican siendo la opción óptima. Nuevamente se señala que la

variabilidad es un factor que brinda gran inseguridad en los resultados, especialmente en las muestras con AF_7%. Mayor cantidad de acelerante se traduce en un fraguado más acelerado, lo que podría producir una pobre interacción entre los elementos que conforma la mezcla, por lo que las mezclas con menor dosificación muestran menor porosidad y mayor fiabilidad.

De manera concluyente se observa que el uso de acelerante es la variable principal que produce mayor porosidad, en especial los de tipo AR. Aun cuando las otras variables analizadas en este estudio tienen incidencia en el resultado de la porosidad, se aprecia que la más influyente ha sido el tipo de acelerante, siendo los AR los que presenta mayor porosidad.

4.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

A continuación, se presentan los resultados de la resistencia a compresión desarrollada por las mezclas cementíceas analizada a la edad de 7 y 28 días [Fig. 4.2]. se debe recordar que estos resultados forman parte de la evaluación de las propiedades básicas del hormigón, por lo que estas muestras nunca estuvieron expuestas al ASE acelerado.

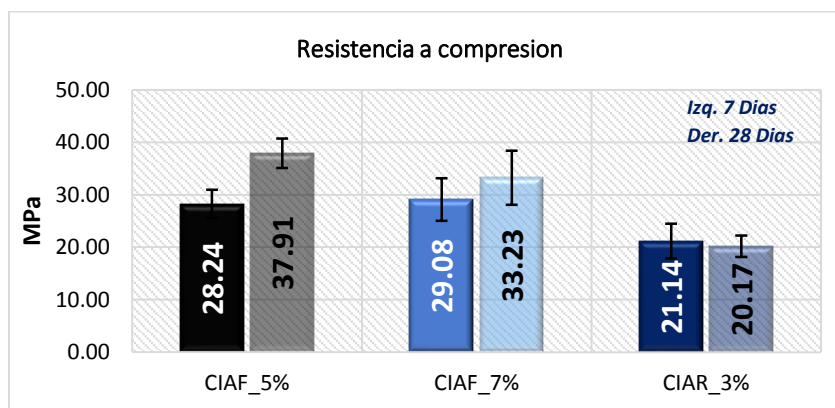


Figura 4.2 Resistencia a compresión

En la figura 4.2 se observa que todas las mezclas cumplen con los requisitos de resistencia a compresión característicos estipulados por la EHE 08 para mezclas cementíceas en masa, el cual es un valor no menor de 20 MPa a los 28 días (EHE-08, 2008). En función del tiempo las muestras con AF presenta un incremento de entre 4 – 9 MPa en la resistencia entre 7 y 28 días, mientras los AR presentan un descenso de 1 MPa.

El deceso en la resistencia de las mezclas con AR es esperado, pues se conoce ampliamente que estas producen altas resistencias iniciales, pero luego descienden. Se puede decir que estas se normalizan bajando hasta su valor real y estable de trabajo. En forma porcentual su resistencia reduce menos de un 5 %, cumpliendo con la EHE 08 en que la disminución de resistencia a compresión de las muestras de ensayo de mortero a los 28 días será inferior al 20% (EHE-08, 2008).

Entre las muestras con AF se observa que las muestras con menor dosificación han desarrollado mayor resistencia a 28 días. Las muestras con AF_5% aparte de presentar mayor resistencia a compresión, también poseen mejor intervalo de seguridad que las AF_7%. Esto puede ser debido a que mayor cantidad de acelerante se traduce en un fraguado más acelerado, lo que podría producir una interacción entre los materiales de la mezcla menos eficiente. Por ende, se concluye con la recomendación de mezclas con AF con dosificaciones de 5 %, para una mejor resistencia a compresión a 28 días.

4.4 INSPECCIÓN VISUAL.

Se realiza la inspección visual para observar el desarrollo progresivo del deterioro en la superficie de los especímenes, tales como grietas, fisuras, desprendimientos, delaminación y ablandamiento, producto del ASE. Esta meticulosa monitorización se lleva a cabo semanal durante el primer mes y luego quincenal a lo largo del experimento. Debido a la gran cantidad de data, se presenta imágenes selectas de las diferentes familias de muestras. Se inicia la exposición de resultados visuales de las probetas especificando que pasadas 23 semanas los especímenes sumergidos en agua potable, no presentan ningún tipo de deterioro en la superficie [Fig. 4.2].



Figura 4.3 Testigos sumergidos en agua

En la figura 4.2 se muestran tres diferentes familias (CII_7D, CIAR1_3%_7D, CIAF2_5%_7D) de especímenes en tiempos distintos. En estas se observan muestras sin acelerante (8X), con AR (5Y) y con AF (3Z), en edades de 29 y 146 días de inmersión en agua. El comportamiento demostrado por estos testigos es el mismo que presentan todas las muestras sumergidas en agua indiferente a los materiales que las componen. Dicho comportamiento es una superficie sin ningún tipo de rasgos de deterioro o daños tras estar sumergidas durante más de 23 semanas.

Con las muestras sumergidas en soluciones con sulfato el comportamiento es distinto y variable, en función de los materiales que las conforman. La tabla 4.1 muestra el periodo en que comienzan a observarse las consecuencias de un ASE acelerado en las distintas familias de testigos, así como su área de desarrollo y el tipo de daño observado.

Nomenclatura	Visualización de daño	Área y tipo de daño
CIAF1_5%_7D	43 – 57 días	Fisuras en los bordes céntricos
CIAF1_5%_28D	61 días	Fisuras en los bordes céntricos
CIAF1_7%_7D	45 – 59 días	Fisuras en los bordes céntricos
CIAF1_7%_28D	-	Manchas blancas en testigo
CIAF2_5%_7D	45 – 59 días	Fisuras en los bordes céntricos
CIAF2_5%_28D	65 días	Fisuras en los bordes esquina
CIAR1_3%_7D	24 – 40 días	Fisuras en los bordes esquina
CIAR1_3%_28D	38 días	Fisuras en los bordes céntricos/esquinas
CIAR2_3%_28D	22 – 36 días	Fisuras en los bordes esquina
CIAR2_3%_7D	3– 29 días	Fisuras en los bordes esquina
CIAR2_3%_28D	8 – 22 días	Fisuras en los bordes esquina
CIASF1_5%_7D	-	Manchas blancas en testigo
CIASF1_5%_28D	-	Manchas blancas en testigo
CII_7D	-	Manchas blancas en testigo
CII_28D	-	Manchas blancas en testigo
CI_7D	-	Manchas blancas en testigo
CI_28D	-	Manchas blancas en testigo

Tabla 4.1 Periodo inicial, área y tipo de deterioro testigos en sulfatos

En la tabla 4.1 se observa que en todas las familias con la combinación de CEM I y AF1 (CIAF1_5%_7D, CIAF1_5%_28D, CIAF1_7%_7D) independiente a su dosificación, el mecanismo de deterioro inicia con fisuras en el centro de las muestras, aunque en tiempos distintos. Mientras en la familia CIAF2_5%_7D y CIAF2_5%_28D pese a poseer la misma dosificación, su distinto tiempo antes de la exposición puede haber provocado que el deterioro inicie en lugares distintos. En las familias con AR siempre se observa el inicio del deterioro en las esquinas del prisma, independiente a la edad de exposición y tipo de cemento. Al mismo tiempo las familias restantes (CIASF1_5%_7D, CIAF1_7%_28D, CIASF1_5%_28D, CII_7D, CII_28D, CI_7D, CI_28D) pasadas 23 semanas de inmersión en sulfatos no presentan deterioro visual severo, solo manchas blancas en el cuerpo prismático del testigo [Fig. 4.4]. Estas manchas se presumen podrían ser la cristalización de las sales de la solución en la superficie de la muestra [Fig. 4.4]. Comparativamente, se encontró que el efecto de la concentración de la solución no era notable en probetas de mortero sin acelerantes (Lee, Kim, & Jung, 2009).



Figura 4.4 Espécimen con cristalización salina

Por lo general la visualización del ataque físico en la superficie de los testigos ocurre primero en las familias con menor edad previo a la exposición. Cabe destacar que, según los periodos de afectación visibles [Tabla 4.1], el deterioro es más precipitado en muestras con AR que con AF. Sobre el grado de deterioro en función al tipo de cemento, no se puede establecer diferencias claras.

El deterioro producto del ASE en la superficie de las muestras con AF inicia con fisuras en los bordes del centro o en las esquinas del testigo las cuales se expande en toda su longitud [Fig. 4.5]. Estas fisuras se van ampliando hasta formar grietas permitiendo la inserción de la solución en la matriz cementícea lo que produce tensiones internas que llevan al desprendimiento del material [Fig. 4.5]. Al mismo tiempo se registran manchas blancas luego de secar la superficie para tomar las imágenes lo que podría ser la fase cristalizada de las sales del sulfato en el interior de los especímenes [Fig. 4.4].

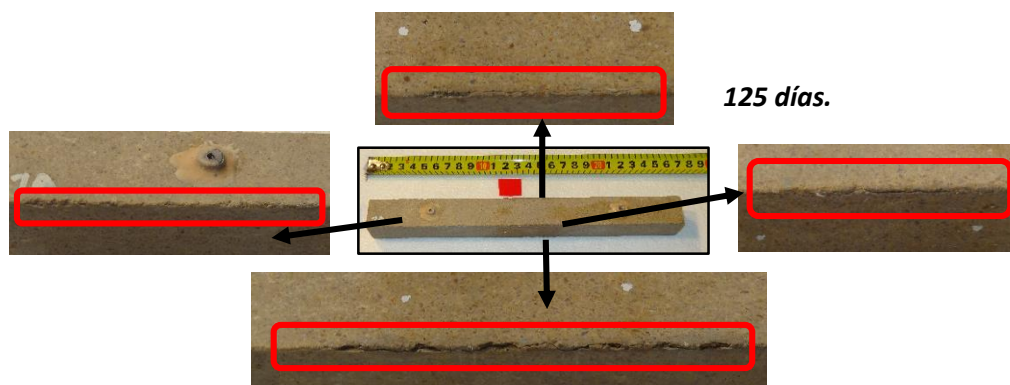


Figura 4.5 Inicio y desarrollo del deterioro en los bordes (CIAF1)

En el caso de las familias con AR, estas presentan mayor vulnerabilidad que las familias con AF. Los grupos con AR a las 23 semanas presenta un deterioro progresivo con mayor ritmo que los AF. El deterioro de las familias con AR inicia en las esquinas del testigo. A continuación, se muestra el desarrollo de la influencia de sulfatos en este tipo de muestras [Fig. 4.6].

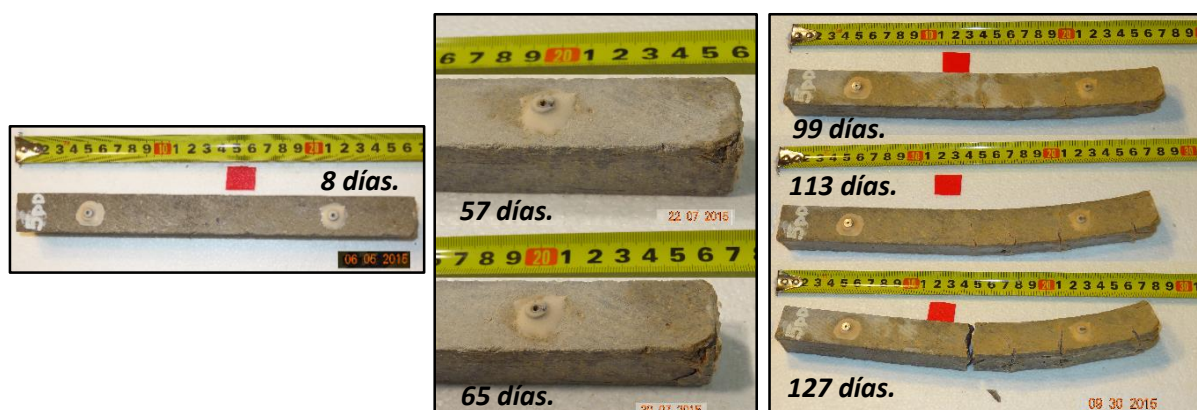


Figura 4.6 Desarrollo de deterioro hasta el punto de falla de muestras (CIAR2_3%-28D) frente a ASE.

La figura 4.6 expone el comportamiento mostrado por distintos especímenes con AR en función de las tensiones internas producidas por el ASE acelerado. La mayoría de las muestras expuestas a $30\text{g SO}_4^{2-}/\text{l}$ demuestran señales de deterioro pasados los 30 días. Macroscópicamente, se observa que el deterioro en todos los casos se produce inicialmente en los bordes superiores de la superficie del espécimen y avanza a lo largo de los bordes. Esta figuración progresiva se presenta en el centro o en las esquinas de la superficie. Conforme se incrementa el tiempo de exposición el daño se produce en todos los bordes y la superficie de los bordes comienza a desprenderse. El desprendimiento de la superficie en los bordes es la forma más predominante de deterioro. Luego del desprendimiento el espécimen comienza a deformarse adquiriendo una curvatura consecuencia de las tensiones producto de la expansión interna lo que repercute en la degradación de la muestra (Drimalas, Clement, Folliard, Dhole, & Thomas, 2011; Lee et al., 2009; Rasheeduzzafar et al., 1994; Ryou et al., 2015; Schmidt, 2007; Tae et al., 2008; Tian & Cohen, 2000).

Las familias que exponen el deterioro más acelerado contienen CEM II y AR. El grupo CIAR2_3%_7D presenta el deterioro más acelerado en el experimento [Tabla 4.1], ha sido el que demuestra menor durabilidad al ASE resultando en la degradación de todos sus testigos [Fig. 4.7].



Figura 4.7 Deterioro de familia CIAR2_3%_7D

La figura 4.7 muestra las distintas formas de falla que presentaron los especímenes de la familia CIAR2_3%_7D y el tiempo transcurrido al alcanzarla. Todas estas muestras revelan una rápida y acelerada afectación al ASE a tal punto que todos los especímenes se desintegraron en 61 días o menos. Las muestras 6B y 6C resultaron terminadas en 18 días mientras la 6E solo tuvo una duración de 11 días, las demás sobrevivieron por encima de los 55 días. Se observa que 5 de 6 muestras fallan de forma transversal y en su centro a excepción de la 6B que falla de forma longitudinal.

En la familia CIAR2_3%_28D el daño inicia en las esquinas del testigo al igual que el grupo anterior (CIAR2_3%_7D) y sus testigos también fueron completamente destruidos por el ASE acelerado, pero en un periodo de tiempo más largo. A continuación, en la figura 4.8 se muestra la degradación de sus primeros testigos.



Figura 4.8 Deterioro de familia CIAR2_3%_28D

Al analizar el deterioro superficial de las muestras en fusión al tiempo en que fueron expuestas, el deterioro generalmente inicia primero en las muestras con edad de 7 días previo a la exposición. pero aparte de las muestras completamente desintegradas no se ve observa una gran diferencia entre el deterioro de ambos tiempos. Se aprecia que la familia que se desintegra en menos de 60 días, tenía una edad de 7 días antes de ser expuesta y que las familias de 28 días presenta un tiempo más prolongado previo a perecer. Esta diferencia entre los tiempos de degradación podría sugerir mayor durabilidad en las muestras con edad de 28 días previo a la exposición.

Al comparar los tipos de cemento utilizados, solo se puede observar que las muestras destruidas presentan menor durabilidad en CEM II (61 días) que en CEM I (133 días). Pero entre las muestras que no han sido destruidas los testigos con CEM II no presenta signos de deterioro, mientras los CEM I sí lo hacen. Por ende, en este punto no se puede determinar cuál es más afectado.

Cuando se confrontan los tipos de acelerante luego de la exposición de las muestras analizadas, es más que obvio que los AR son más afectados que los AF por el ASE acelerado. Los AR son acelerantes con basados en aluminatos los cuales pueden haber reaccionado con los sulfatos de en la solución produciendo un deterioro más acelerado. La resistencia de lo AR se reduce a largo plazo, lo que puede sugerir que la muestra se debilita permitiendo un incremento del flujo de la solución en su interior, permitiendo la deposición de elementos expansivos en su matriz cementícea.

En cuanto a la diferente dosificación de AF en las muestras con más acelerantes el deterioro exterior es más tardío. Esto podría representar una mayor resistencia al ASE acelerado, al incrementar la dosificación de AF. Sobre el avance que presenta el deterioro en ambas dosificaciones, es prácticamente igual.

De forma concluyente se observa que la variable principal que marca el deterioro en las muestras es el tipo de acelerante, siendo los más afectados los AR. Relacionando los resultados anteriores con los de la inspección visual se nota que el grupo más afectado, presenta la mayor porosidad entre todas las muestras y la menor resistencia a compresión.

4.5 EXPANSIÓN LINEAL.

Para presentar la expansión real, se ha utiliza el método presentado por Paglia donde la expansión linear neta se obtiene como la diferencia matemática entre las probetas testigos sometidas a la solución de Na_2SO_4 menos los especímenes curados en agua [Anejo C1] (Paglia, Wombacher, & Bo, 2003). A continuación, se muestran los gráficos que representan las expansiones en las diferentes familias, en (%)/días (ASTM C1012, 2004; Paglia et al., 2002)

4.5.1 Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición.

A continuación, se realiza el análisis sobre los porcentajes de expansión presentados por las muestras en función a su proceso de producción, es decir mezclas proyectadas y no proyectadas [Fig. 4.9].

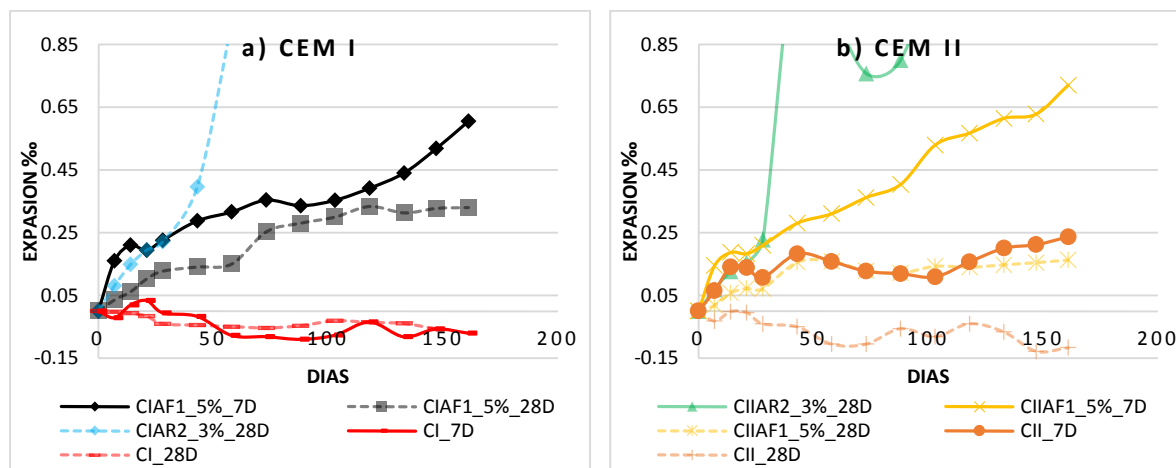


Figura 4.9 Influencia del proceso de producción: a) CEM I b) CEM II

En la figura 4.9 se comparan las expansiones de mezclas proyectadas y no proyectadas. Las mezclas no proyectadas son aquellas que no poseen acelerantes en su composición. El comportamiento general de las mezclas no proyectadas es de retracción en lugar de expansión, a diferencia de las mezclas proyectadas las cuales presenta un comportamiento expansivo creciente. Esta diferencia entre sus comportamientos puede ser producto de que las proyectadas presentan altos porcentajes de porosidad. También puede ser producto de la reacción pueden presentar la composición de los acelerantes con los sulfatos de la solución. Las mezclas no proyectadas son menos porosas, lo puede traducirse en mejor cohesión, mejor hidratación y por ende una matriz cementícea más compacta y resistente al ASE.

Con respecto al ambiente de exposición, las muestras inmersas en agua no presentan cambio significativo en su porcentaje de expansión, por lo que como se utilizan como factor normalizador de los resultados de expansión de las muestras inmersas en la solución sulfática.

4.5.2 Influencia de la edad de exposición.

Se inicia presentando la evolución del ASE acelerado en función al tiempo previo a la exposición [Fig. 4.10 y 4.11]. En esta presentación como segunda variable de agrupación se utiliza el tipo de cemento empleado, comenzando con el CEM I [Fig. 4.10].

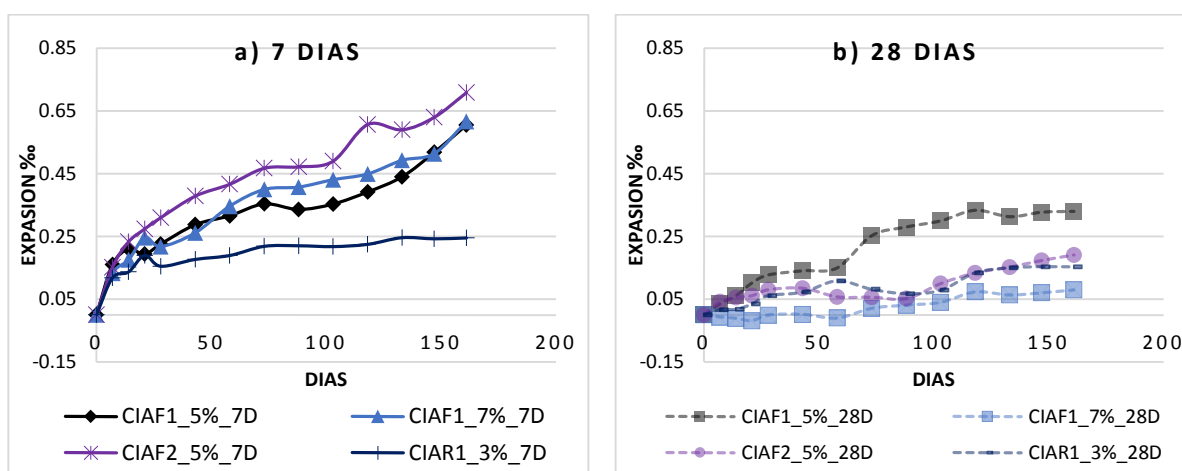


Figura 4.10 Influencia de la edad de exposición CEM I: a) 7 días antes de exposición b) 28 días antes de exposición

La figura 4.10 y 4.11 muestran el comportamiento expansivo de muestras con 7 y 28 días previos a la exposición al ASE acelerado. Las muestras con 7 días previos a la exposición [Fig. 4.10a y 4.11a] generalmente presentan porcentajes de expansión por encima de 0.30 % y un incremento continuo en función al tiempo de inmersión. Mientras que los porcentajes de expansión de las muestras con 28 días previos a la expansión [Fig. 4.10b y 4.11b] generalmente se encuentran por debajo de 0.30 %.

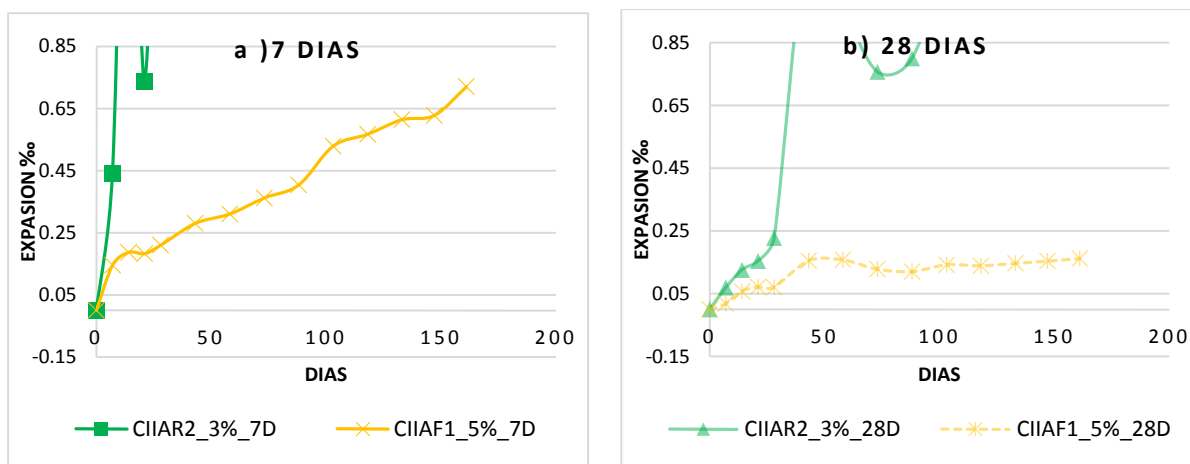


Figura 4.11 Influencia de la edad de exposición CEM II: a) 7 días antes de exposición b) 28 días antes de exposición

En las figuras 4.10 y 4.11 se observan desarrollos expansivos que exceden la escala utilizada para la presentación del comportamiento expansivo. Estas son muestras que han sido completamente desintegradas presuntamente producto del ASE acelerado. De estas muestras desintegradas sus porcentajes de expansión fueron: 21.20 % para CIAR2_3%_7D y 3.38 % CIAR2_3%_28D. El porcentaje de la muestra de 7 días que excede la escala grafica es de 21.20 %, es decir 20 veces más elevado que cualquier otra de sus muestras. En las de 28 días el valor alcanzado es 3.78 % [Anejo C1] el cual es 10 más elevado que en las otras familias. Las muestras con menor edad previo a la expansión muestran porcentajes mayores previo a su desintegración. Esto puede ser debido a que quizás la expansión ocurre cuando el material todavía es flexible, es decir presenta un mejor comportamiento elástico, acomodando mejor los elementos expansivos en la matriz cementícea.

4.5.3 Influencia del tipo de cemento.

La figura 4.12 presentan el comportamiento expansivo desarrollo por las muestras en función del tipo de cemento. El grafico de la izquierda [Fig. 4.12a] expone las muestras con CEM I 52.5 R y el grafico derecho [Fig. 4.12b] las muestras con CEM II A-L 42.5 R.

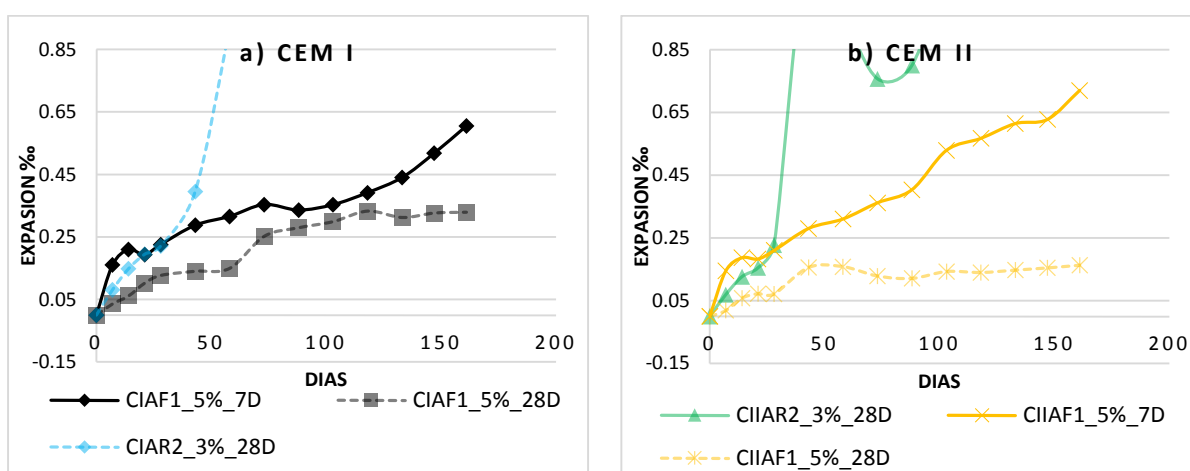


Figura 4.12 Influencia del tipo de cemento: a) CEM I 52.5 R b) CEM II A-L 42.5 R

Al comparar los resultados de expansión en función del tipo de cemento utilizado no es posible observar una influencia significativa del tipo de cemento. Esto es producto de que sus líneas de tendencia no permiten identificar una diferencia clara en el comportamiento presentado por los mismos producto del ASE acelerado.

4.5.4 Influencia del tipo de acelerante.

Para esta parte se muestran las gráficas de expansión lineal en función de los acelerantes utilizados, es decir, los grupos de libres de álcalis (AF) [Fig. 4.13a y 4.14a], y los grupos ricos en álcalis (AR) [Fig. 4.13b y 4.14b]. Como se hizo previamente se utiliza el tipo de cemento como segunda variable expositiva. Se destaca que la figura 4.14b tendrá una escala diferente a la adoptada en los distintos análisis para observar la tendencia expansiva de las muestras analizadas.

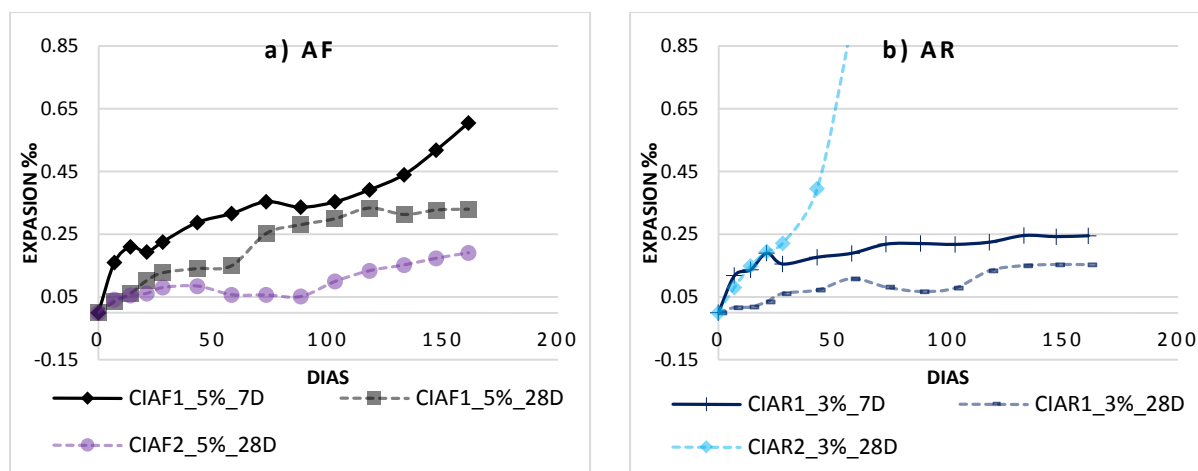


Figura 4.13 Influencia del tipo de acelerante (CEM I): a) AF b) AR

Al analizar las figuras 4.13 y 4.14 se observa que todas las mezclas con AF presentan expansiones por debajo del 0.80 %. Al mismo tiempo el 40 % de las mezclas con AR presentan expansiones por debajo de 0.25 % y el otro 60 % es más de 10 veces mayor.

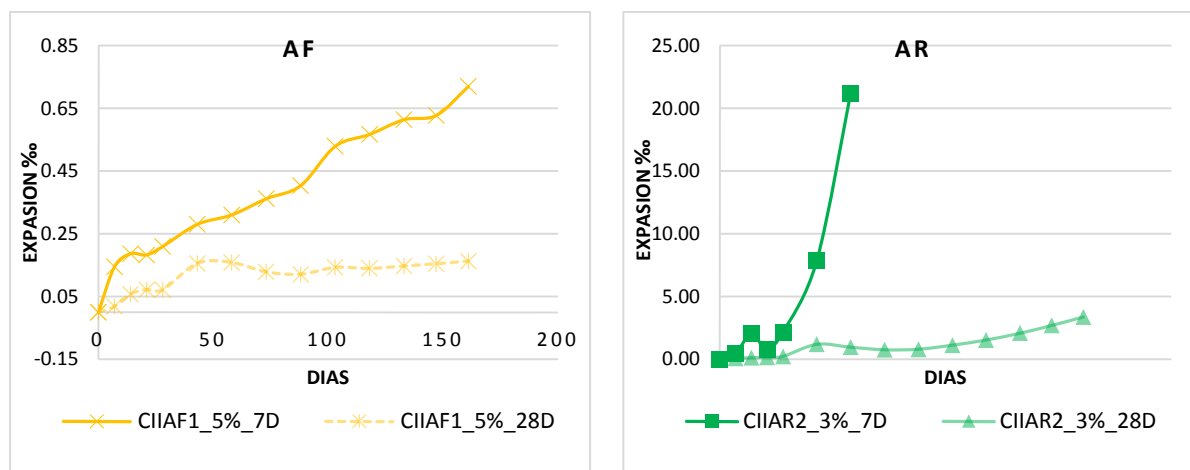


Figura 4.14 Influencia del tipo de acelerante (CEM II): a) AF b) AR

Como se ha observado a lo largo del análisis la variable principal sobre la que se ha definido el ASE acelerado es el tipo de acelerante, siendo los AR los más perjudicados. En la figura 4.14b se observa el incremento exponencial que significa el ASE en función de dicho acelerante, donde las muestras presentan expansiones superiores al 0.80 % en el cual es el límite de las muestras con AF [Fig. 4.14a].

El deterioro en las muestras con AR es tan acelerado que la primera familia desintegrada resistió menos de 60 días y presentó una expansión de 21.20 ‰ (CIAR2_3%_7D). Las otras familias destruidas presentan resistencia hasta los 133 días con expansión de 7.10 ‰ (CIAR2_3%_28D) y 161 días con una expansión de 3.38 ‰ (CIAR2_3%_28D).

De forma concluyente hasta este punto se observa que las familias destruidas presentan como variable común el tipo de acelerante AR que presenta los mayores porcentajes de porosidad, además presenta los mayores porcentajes de expansión y menor resistencia a la compresión. El tipo de cemento y periodo de inicio del ataque, se aprecian como variables afectadas de forma secundaria. El hecho de que los AR sean los más afectados como se comentó anteriormente puede ser producto de su pérdida de resistencia, alta porosidad, cohesión más deficiente y menor estabilidad producto de la rapidez en que se realiza el proceso de fraguado.

4.5.5 Influencia de la dosis de acelerante.

La tendencia expansiva a lo largo de 161 días de exposición a ASE acelerado con distintas dosificaciones de AF es presentado en la figura 4.15.

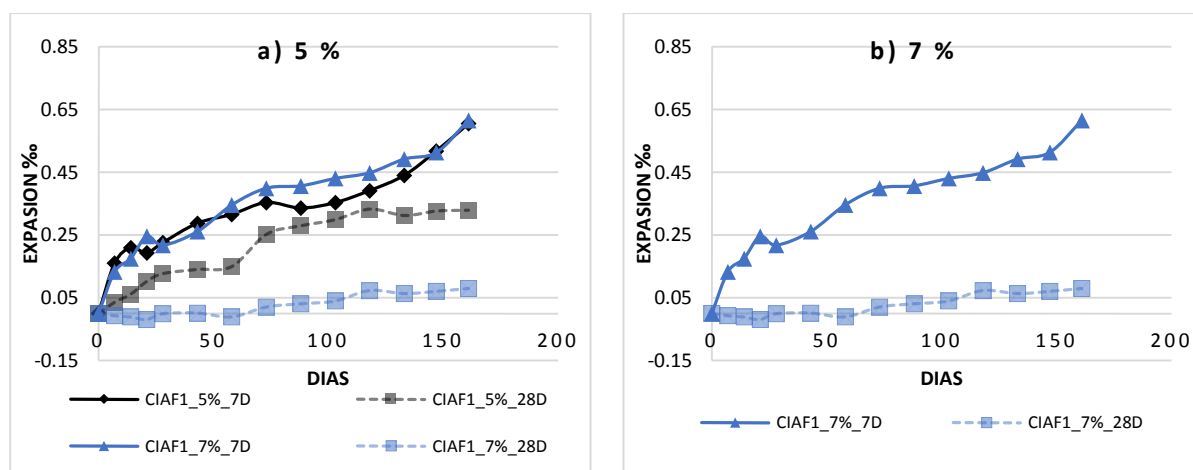


Figura 4.15 Influencia de la dosis de acelerante: a) 5 % b) 7 %

Cuando se compara la acción expansiva del ASE acelerado en muestras con 5 % y 7 % de acelerantes AF no se observan grandes diferencias luego de 23 semanas de exposición. Sus familias más afectadas alcanzan prácticamente el mismo porcentaje de expansión al final del periodo analizado. Mientras las muestras menos afectadas presentan una diferencia de 0.25 ‰ de expansión, siendo las que poseen mayor dosificación las que menos expanden. Estas tampoco presentan ningún tipo de deterioro exterior luego de 23 semanas de exposición. Al momento de las mediciones finales no es seguro afirmar cual dosificación es más eficiente, pues ambas todavía presentan resultados muy estables y similares al ASE acelerado.

4.5.6 Expansiones máximas alcanzadas.

A continuación, en la figura 4.16 se exponen las máximas expansiones alcanzadas por las distintas familias estudiadas luego de 23 semanas o 161 días de exposición a un ASE acelerado. se debe destacar que también se presentan las expansiones máximas de las familias que se desintegraron antes de los 161 días de exposición.

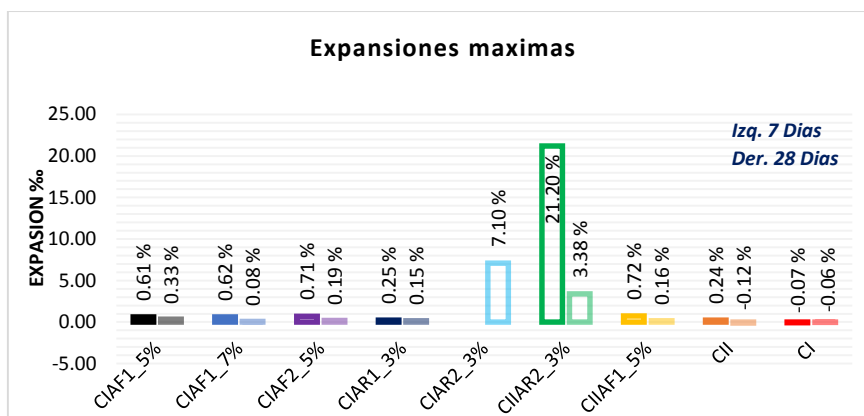


Figura 4.16 Expansiones lineales máximas alcanzadas en 161 días de exposición.

Se observa que el 90 % de las muestras con 7 días previo a la exposición tienen mayor expansión que las de 28 días. Conjuntamente el 80 % de los especímenes muestra expansión por debajo de 0.75 %, mientras las familias que sobrepasan este porcentaje poseen AR2 y todas se han desintegrado. La primera familia en desintegrarse fue la CIIAR2_3%_7D en 58 días, la segunda CIAR2_3%_28D en 133 días y la CIIAR2_3%_28D a los 161 días. Estas familias AR han presentado los mayores porcentajes de porosidad, combinados con baja resistencia y ahora el mayor porcentaje de expansiones.

La norma ASTM C1012 presenta expansiones máximas admisibles en función de la cantidad de muestras analizadas en 18 meses de exposición (ASTM C1012, 2004) [Anejo A6]. El valor máximo de expansión que presentan para el análisis de 6 testigos de cemento portland es de 12.0 %. De las muestras destruidas solo una muestra pasa este límite con 21.20 % en apenas 58 días (CIIAR2_3%_7D) [Anejo C1]. Aun cuando las otras muestras destruidas presentan valores por debajo de este límite, el tiempo en que presentan los altos porcentajes expansivos es 3 veces menor al tiempo máximo de la norma. Considerando que la norma ha sido diseñada para mezclas cementíceas de producción manual o mecánica y no proyectada, se observa una gran diferencia en el comportamiento de las mezclas proyectadas presentando mayor vulnerabilidad al ASE acelerado.

4.6 VELOCIDAD DE ONDA DE ULTRASONIDOS.

Para iniciar se destaca que según los criterios de calidad de mezclas proyectadas desarrollados por Leslie y Cheesman [Anejo A3] la calidad de los morteros proyectados se encuentra en el rango de regular y bueno con velocidades superiores a 3,300 m/s [Anejo C3] (Proceq SA, 2014; Solís Carcaño, Moreno, & Castillo Pak, 2004). Lo que refleja un buen trabajo en la técnica de proyección del material. Para la exposición de los resultados obtenidos, se presenta la diferencia entre la velocidad de onda inicial y la velocidad de onda obtenida en los días consecuentes.

El formato de exhibición es el siguiente; primero comparación de muestras en proceso de producción y ambiente de exposición: H_2O y Na_2SO_4 [Fig. 4.17], luego por edad de exposición [Fig. 4.18 y 4.19], seguido por los tipos de cemento [Fig. 4.20] y tipo de acelerantes [Fig. 4.21 y 4.22], finalizando por la distinta dosificación [Fig. 4.23]. Conjuntamente se muestran los gráficos de los especímenes sumergidos en agua y en la solución con sulfatos [Anejo C2].

4.6.1 Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición.

Como ya se ha planteado anteriormente se inicia la presentación con una comparación entre muestras por su proceso de producción y ambiente de exposición [Fig. 4.17].

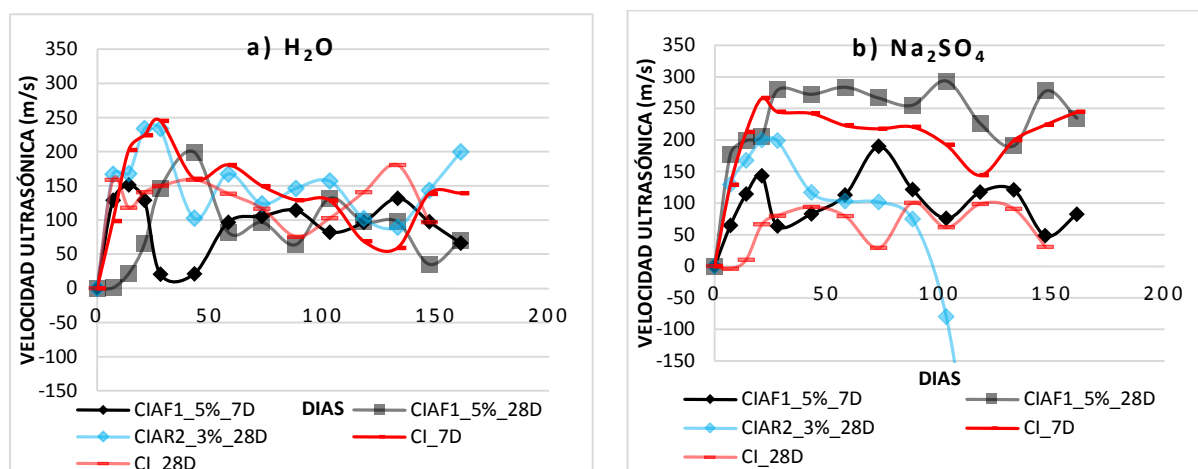


Figura 4.17 Influencia del proceso de producción y ambiente de exposición: a) en agua b) en Na₂SO₄

Lo primero que destaca la investigación es que generalmente las familias sumergidas tanto en agua como en sulfatos al inicio de la exposición mantienen un ritmo de incremento de velocidad de onda ultrasónica. Este resultado puede indicar una densificación o compactación de los especímenes (Schmidt, 2007). Las muestras sumergidas en agua [Fig. 4.17a] presenta valores de velocidad con intervalos de variación menores de 50 m/s. Lo que podría significar que son estables y posiblemente no sean significativamente afectas al estar inmersas en agua. Las muestras sumergidas en sulfatos [Fig. 4.17b] presenta intervalos de variación de velocidad superiores a 50 m/s, además de grupos que poseen descensos de velocidad abruptos, lo que no sucede en las muestras inmersas en agua. Estos descensos de velocidad pueden representar el agrietamiento interno de las muestras.

En cuanto a la comparación por proceso de producción, las muestras no proyectadas presentan una línea de tendencia más lineal que las mezclas proyectadas. Los cambios de velocidad presentados por las mezclas no proyectadas son menores que los de las mezclas proyectadas. Esto puede representar que el proceso de hidratación en las mezclas no proyectadas fue mejor, resultando en muestras más compactas, que las muestras proyectadas.

4.6.2 Influencia de la edad de exposición.

Mientras más constante es el patrón descrito por la velocidad de las muestras luego de su incremento inicial, más estable es su matriz hidratada. A continuación, en las figuras 4.18 y 4.19 comparan las muestras con 7 y 28 días previos a la exposición al ASE acelerado. Como segunda variable de exposición se organizan por tipo de cemento. Las variables que exceden la escala de presentación representan familias completamente desintegradas.

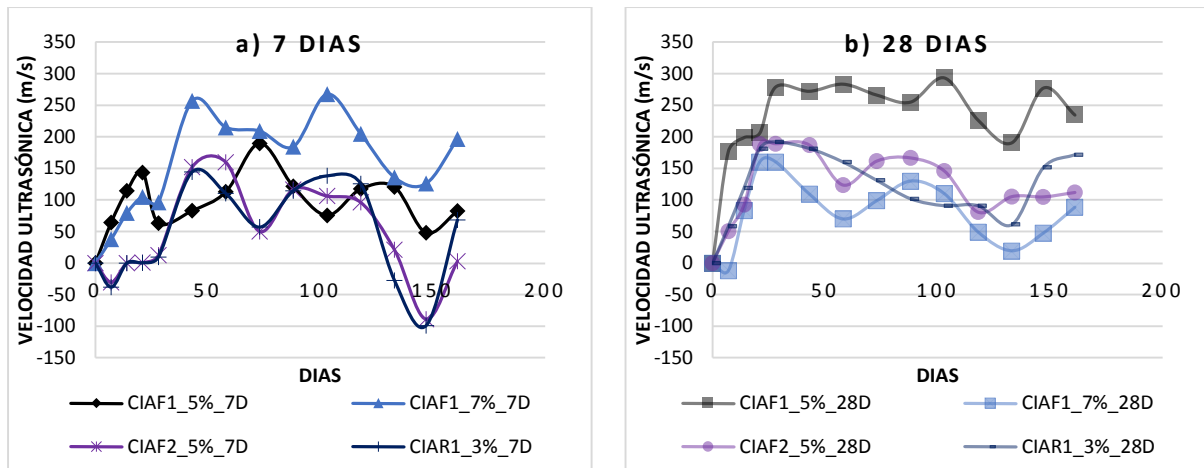


Figura 4.18 Influencia de edad de exposición (CEM I): a) 7 días b) 28 días

Generalmente las muestras con 7 días previos a la exposición [Fig. 4.18a y 4.19a], presenta la estabilización de su patrón de comportamiento en velocidades mayores a las muestras con 28 días [Fig. 4.18b y 4.19b] con diferencias de entre 100 – 200 m/s. Como es conocido los valores más altos de velocidad representan mayor densidad y compactación del material. Por lo tanto, cuando las muestras sometidas a Na_2SO_4 presentan una pendiente negativa constante, se puede interpretar como la aparición de una fisura o como la desintegración de uno de sus especímenes.

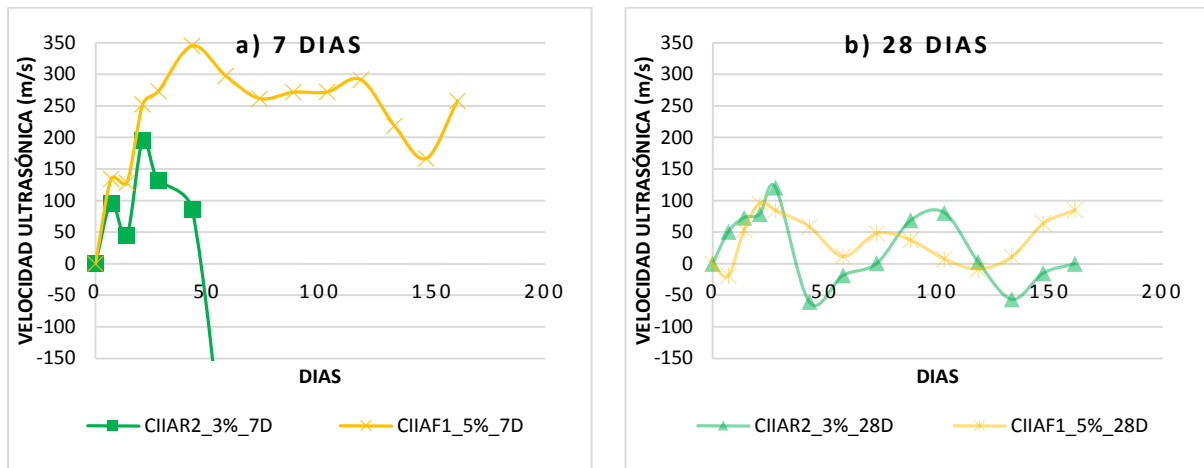


Figura 4.19 Influencia de edad de exposición (CEM II): a) 7 días b) 28 días

El comportamiento de caídas de velocidad abrupta o de forma paulatina es ampliamente reconocible en las familias en las que parte de sus especímenes han sido destruidos por el ASE acelerado. Esto es claramente observable en la familia CIAR2_3%_7D que han sido completamente deteriorada, pero es más difícil de apreciar en la familia CIAR2_3%_28D. Se puede observar que generalmente las muestras empiezan a tener irregularidades en su velocidad pasados los 100 días de exposición siendo claramente observable en las muestras de 7 días. Las muestras con edad de 7 días luego de 100 días de exposición presentan los descensos más abruptos de velocidad, los cuales combinados con los altos porcentajes de expansión pueden representar la vulnerabilidad a esta edad de exposición.

4.6.3 Influencia del tipo de cemento

A continuación, se presentan los resultados de velocidad ultrasónica agrupados por el tipo de cemento [Fig. 4.20]. El grafico de la izquierda [Fig. 4.20a] expone las muestras con CEM I 52.5 R y el grafico derecho [Fig. 4.20b] las muestras con CEM II A-L 42.5 R.

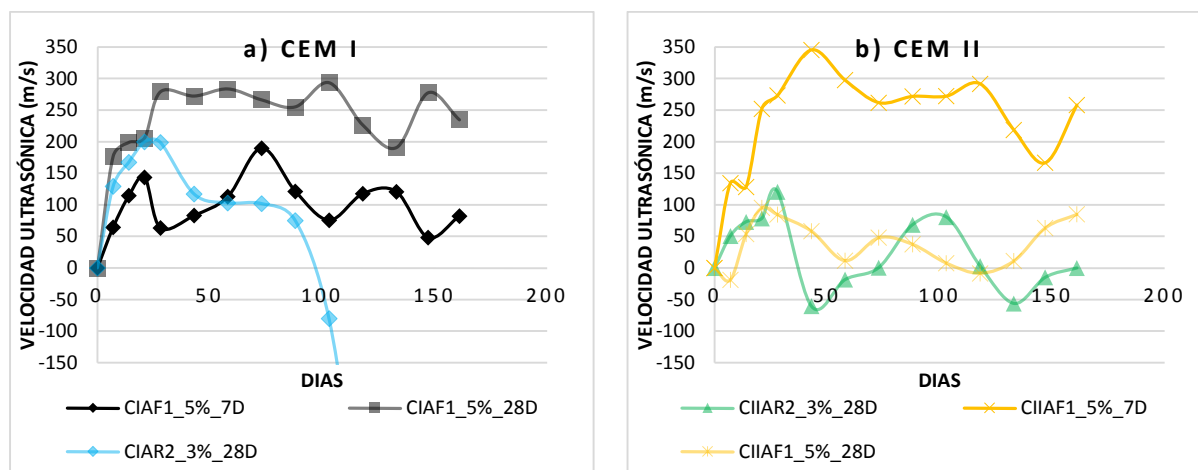


Figura 4.20 Influencia del tipo de cemento: a) CEM I b) CEM II

Aun cuando se utiliza el ensayo de ultrasonidos como técnica complementaria para la evaluación de la influencia del tipo de cemento en el avance del ASE acelerad, no es posible establecer un planteamiento definitivo en función a los resultados obtenidos. Las tendencias de las muestras siguen variando en función al tipo de acelerante y edad de exposición de forma clara, pero no se aprecia una diferencia concreta en el comportamiento en función del cemento

4.6.4 Influencia del tipo de acelerante

Las figuras 4.21 y 4.22 exponen los resultados de velocidad ultrasónica agrupados por el tipo de acelerante, como segunda variable de exposición se organizan por tipo de cemento. Se reitera que las variables que exceden la escala de presentación representan familias completamente desintegradas [Anejo C2].

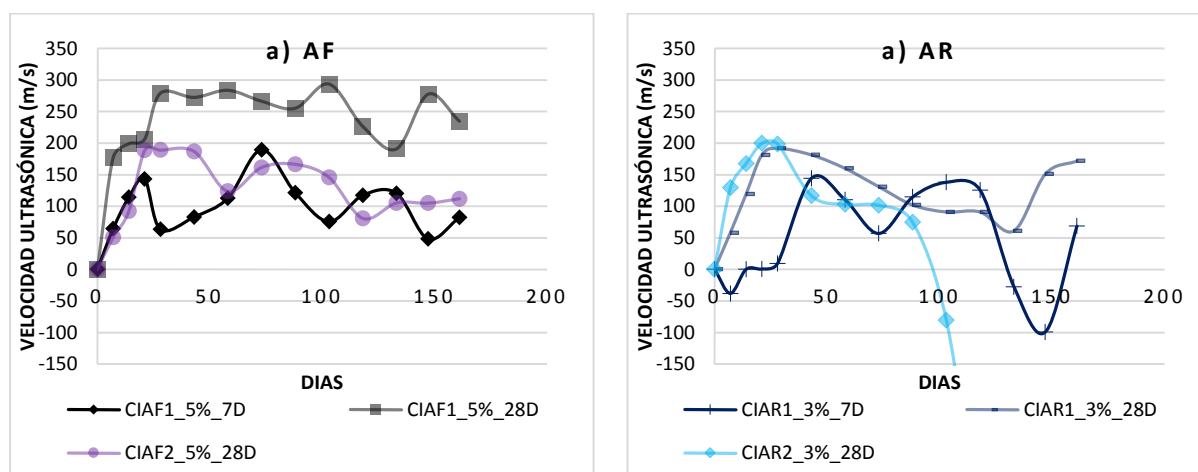


Figura 4.21 Influencia del tipo de acelerante (CEM I): a) AF b) AR

Al comparar los distintos acelerante se observa que generalmente las mezclas con AF [Fig. 4.21 y 4.22] presentan velocidades más altas que las muestras con AF. Esta mayor velocidad de onda ultrasónica

puede reflejar una mejor interacción entre los componentes de los AF, traduciéndose en una matriz cementícea más compacta.

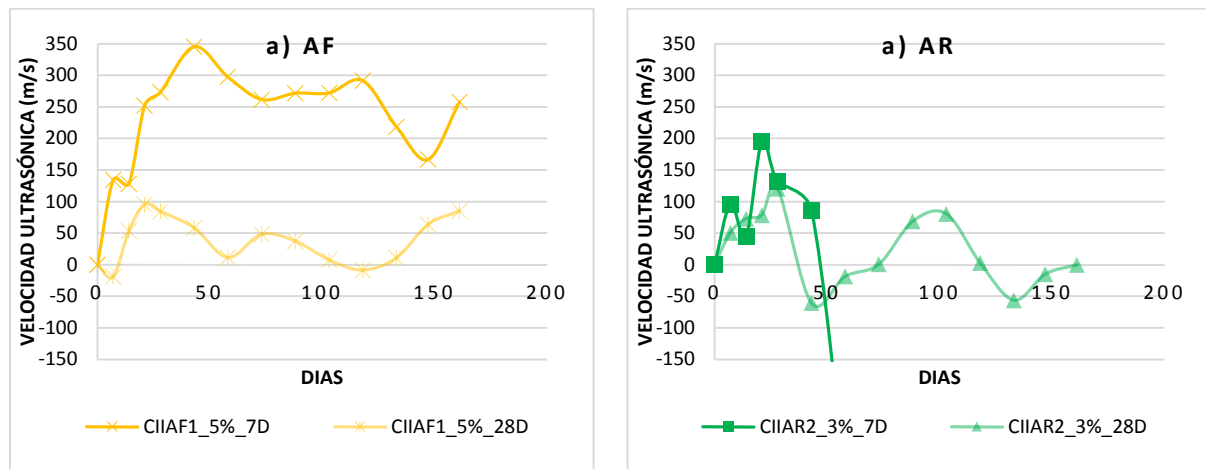


Figura 4.22 Velocidad Ultrasónica de muestras CEM II inmersas en Na_2SO_4 con acelerante: a) AF b) AR

Cuando se comparan los distintos tipos de acelerantes utilizados se observa que los primeros que muestran pérdida de velocidad son los AR, luego de 7 días de inmersión [Fig. 4.22b]. Luego de esto todos los tipos de acelerante presenta pendientes negativas que podrían traducirse en potenciales agrietamientos internos. Las familias con AF [Fig. 4.21a y 4.22a] generalmente presentan pendientes descendientes con valores de 120 m/s luego de 88 días de exposición. Este comportamiento se da igual en el resto de las muestras con AR luego de 73 días [Fig. 4.20b y 4.21b] de exposición. Las muestras con AR desintegradas presentan un descenso de velocidad constante e invariable.

De forma concluyente se recalca que el tipo de acelerante utilizado es la variable principal a considerar en función a la durabilidad frente a AS. Se observa que la utilización de AR sigue siendo el principal factor del avance del deterioro de las muestras producto del ASE acelerado, el cual puede ser debido a su base en aluminatos alcalinos.

4.6.5 Influencia de la dosis de acelerante.

En este apartado se analizan la diferencia entre las velocidades ultrasónicas obtenidas en muestras con un mismo tipo de acelerante, pero en distintas dosificaciones [Fig. 4.23]. El tipo de acelerante analizado es libre de álcalis en dosificaciones de 5 y 7 %.

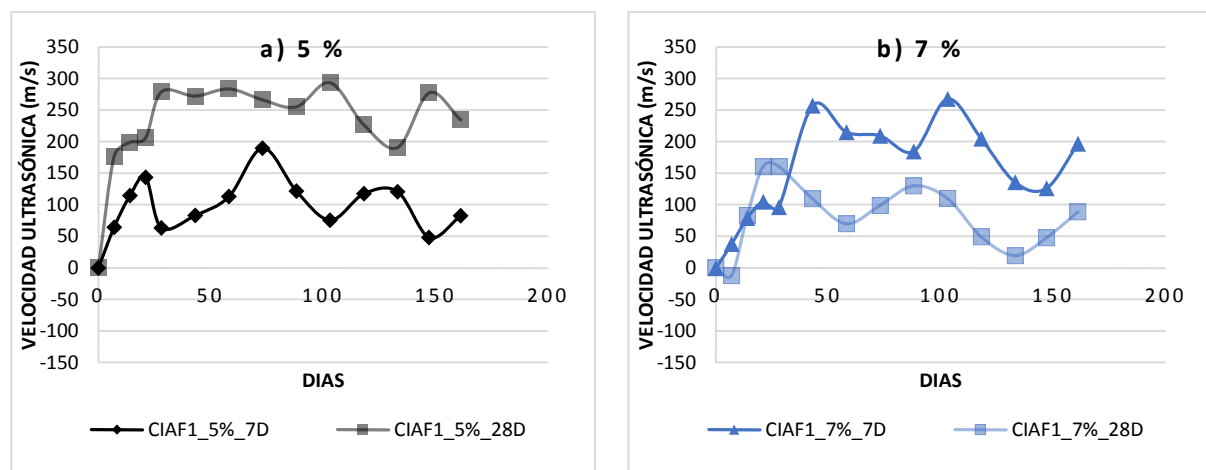


Figura 4.23 Influencia de la dosis de acelerante: a) 5 % b) 7 %

Estas muestras presentan poco deterioro en su superficie, con el 50 % de las muestras con 7 % de AF sin presentar rastros de daño luego de 23 semanas de exposición. Cuando se observan los ultrasonidos de estas muestras tanto los de 5 % como los de 7 % nuevamente presentan un desarrollo de velocidad caótico. Ambas muestras presentan descensos de velocidad que pueden representar la formación de grietas internas luego de 70 días. Sin embargo, producto de que su expansión aún se encuentra muy por debajo de los límites peligrosos y no se observa daño exterior importante, aun no se puede concluir cual sea más afectado.

4.7 DIFRACCIÓN DE RAYOS-X (DRX).

El análisis de DRX se utilizó para analizar la composición de las muestras después de 23 semanas de almacenamiento en agua y solución de Na_2SO_4 a temperatura ambiente y controlada. Debido al tamaño relativamente pequeño de las probetas y las especificaciones del ensayo, se corta toda la sección transversal de un borde de las muestras, luego este es triturado y posteriormente analizado. El área de donde se toman las muestras de los testigos inmersos en sulfatos, al momento de su extracción puede ser un área en deterioro [Tabla 4.1] (Senhadji et al., 2010).

Los DRX muestras resultados de las fases cristalinas formadas. Se utiliza en este caso para obtener información sobre el impacto de los ASE acelerado en los especímenes. Sin embargo, también proporcionan información sobre los productos de hidratación que están siendo atacados y qué productos de reacción se están formando (Drimalas et al., 2011). Los resultados se obtuvieron mediante la aplicación de técnicas cuantitativas avanzadas de XRD, específicamente el análisis Rietveld para estimar el tipo y cantidad de los productos de hidratación o reacción presentes en una muestra dada (Drimalas et al., 2011; Speakman, 2012). Se debe resaltar que los resultados obtenidos pueden ser más refinados.

Los resultados presentados a continuación son de muestras con un periodo de 20 y 40 días de inmersión en agua y 30 g/L de Na_2SO_4 . Los diagramas de DRX indican la presencia de etringita, yeso, portlandita, AFm, cuarzo, caliza, alita, etc., productos esperados por la hidratación del cemento y el ASE acelerado (Ryou et al., 2015; Senhadji et al., 2010). La evaluación y presentación de los resultados se centra en la etringita [Fig. 4.24], yeso [Fig. 4.254], portlandita [Fig. 4.26], fase AFm (monocarboaluminato) [Fig. 4.27] (Drimalas et al., 2011; Irassar, Bonavetti, & Menéndez, 2010). Se elige la muestra al tiempo de 20 días para observar el comportamiento de las muestras en un periodo inicial de inmersión. Mientras la muestra realizada a los 40 días se realizó para observar el comportamiento químico de las muestras que se deterioraron en este periodo.

4.7.1 Porcentaje de etringita.

Para el análisis de los gráficos de resultados primero se explica la leyenda utilizada para evitar confusiones. El primer carácter (7D o 28D) representa los días antes de exponer los especímenes a las soluciones, mientras el segundo (20D o 40D) representa los días en inmersión a los que se realiza el DRX. La figura 4.24 presenta el contenido de la fase de etringita representativo de las muestras con 7 y 28 días antes de ser sumergidas en agua [Fig. 4.24a] y en sulfatos [Fig. 4.24b].

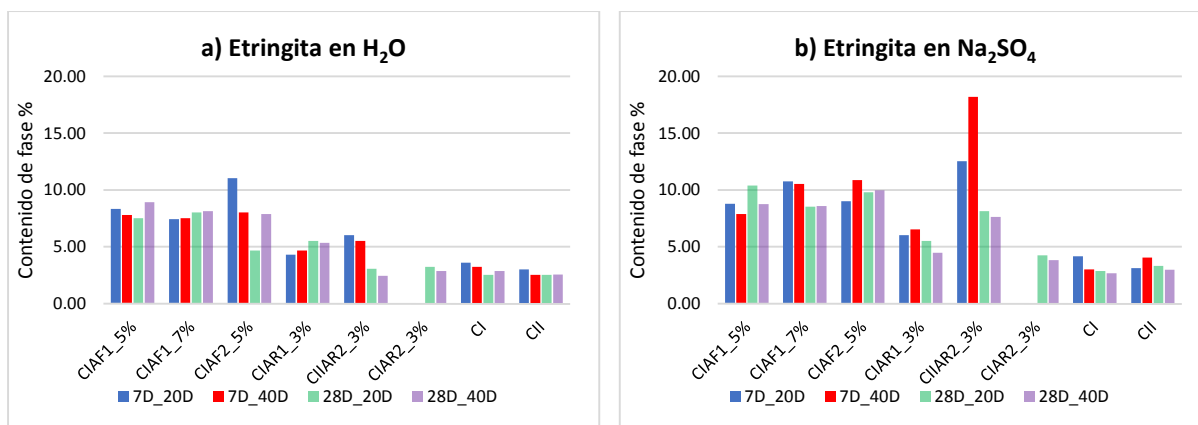


Figura 4.24 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de Etringita: a) en H₂O b) en Na₂SO₄

El 70 % de las muestras con edad de 7 días sumergidas en agua [Fig. 4.24a] muestran un descenso en el contenido de etringita de un periodo al otro. Esto puede deberse a que la etringita no es una fase estable en las mezclas cementíceas y al haberse consumido la fuente de sulfatos pasa a convertirse a la fase Aft. Para las muestras con 28 días de curado, más del 60 % de sus especímenes presenta un incremento en el contenido de etringita de un periodo de inmersión al otro. El porcentaje incremental lo componen todas las mezclas con AF y las muestras de referencia, por lo que todos los AR presenta un descenso de etringita indiferente de su tipo de cemento.

Comparando tipos de cemento de muestras en agua [Fig. 4.24a], los CEM I presenta mayor contenido de etringita. Esto puede ser producto de que tiene mayor porcentaje de C₃A que puede reaccionar con los sulfatos y formar etringita. El promedio de etringita de muestras con CEM I con 7 días previos a la exposición a los 20 días de inmersión es de 5.68 % y a 40 días es de 5.11 % de etringita. Los que tiene CEM I con 28 días previos a la exposición a los 20 días de inmersión presenta un 4.41 % mientras los de 40 días de inmersión tienen 4.70 % observándose claramente un incremento del material. Al mismo tiempo los CEM II con 7 días previos a la exposición con 20 días de inmersión presenta un 4.51 % y a los 40 días se decrecen a un promedio de 4.01 % de etringita. Los CII 28 días previos a la exposición a los 20 días tienen un porcentaje de 2.80 % disminuyendo a un promedio de 2.50 % a los 40 días. Cuando se comparan los tipos de acelerante se observa que los porcentajes de etringita en los AF son generalmente mayores que en los AR y muestras sin acelerante en agua [Fig. 4.24a]. Para las muestras con AF y 7 días previos a la exposición el contenido de etringita decrece o incrementa de un periodo al otro, pero para las AF y 28 días previos a la exposición el comportamiento es siempre en aumento. La familia CIAF2_7D destaca por tener 11% de etringita a los 20 días de inmersión, mientras para los AR quien destaca es CIAR2_7D con más de 6 % de etringita.

En las muestras sumergidas en sulfato [Fig. 4.24b] con 7 días de curado el 50 % decrecen de un periodo de análisis al otro. Este porcentaje está conformado por varias familias con AF (CIAF1_5%, CIAF2_7% y CIAR_3%) y la referencia CEM I. En las familias con 28 días de curado el 75 % de las muestras tiende a disminuir su contenido de etringita de un periodo al otro. Las únicas muestras que presenta un incremento son las CIAF1_5% y CIAR_3%.

Cuando se observan las muestras en sulfato [Fig. 4.24b] por tipo de cemento, se aprecia que los CEM I presenta más etringita que los CEM II, posiblemente por el contenido de C₃A. Los promedios en muestras con CEM I y 7 días previos a la exposición de 6.40% a los 20 días de inmersión y decreciendo a 5.98 % en 40 días, por la inestabilidad de la etringita. Siguiendo la misma tendencia los CEM I y 28 días previos a la exposición presentan un promedio general de 5.67 % de etringita a los 20 días de inmersión y también descienden a 5.27 % a los 40 días. A diferencia de los CEM I con 7 días previos a

la exposición los CEM II con 7 días previos a la exposición presentan un incremento porcentual en su contenido de etringita de 7.82 % luego de 20 días de inmersión a 11.12 % a los 40 días. Mientras las muestras con CEM II y 28 días previos a la exposición presenta el comportamiento descendiente de 5.72 % a 5.30 % de 20 a 40 días de inmersión en Na_2SO_4 .

Cuando se analizan por tipos de acelerante, todas las muestras con AF fácilmente superan el 7.5 % de etringita, cosa que solo consigue una familia con AR. Por lo que se observa que los AF desarrollan mayor etringita que los AR y las muestras sin acelerante. Sin embargo, es apreciable que los mayores porcentajes de etringita son desarrollados en las familias con CIAR2 donde poseen hasta 18 % de etringita, la mayor cantidad del estudio. Esto puede ser debido a la pérdida de cohesión de la muestra con AR, lo desestabiliza su composición, permitiendo más interacción entre los sulfatos y la base química del acelerante para crear material expansivo.

De forma concluyente al comparar las muestras en agua con las muestras en sulfato [Fig. 4.24b] es apreciable que por lo general los contenidos de etringita de las muestras en sulfatos son mayores que en las muestras en agua. Esto puede ser producto de la reacción química de los componentes de las mezclas con los sulfatos. Las mezclas con AR son las que presentan mayor producción de etringita, seguidas por las AF y finalizando con las mezclas sin acelerante. Por lo que la reactividad del acelerante con los sulfatos es la variable predominante en la creación del material expansivo. En las distintas dosificaciones de AF la muestra con mayor acelerante presenta más etringita en su exposición más temprana cuando se permite mayor interacción entre los elementos que componen la mezcla y los sulfatos. Esta interacción permite mayor creación de material expansivo, por lo que a mayor cantidad de acelerante mayor cantidad de material de expansión.

4.7.2 Porcentaje de yeso.

En la figura 4.25 se expone de forma gráfica el contenido de yeso representativo de las muestras con edad de 7 y 28 previo ser sumergidas en agua [Fig. 4.25a] y en sulfatos [Fig. 4.25b].

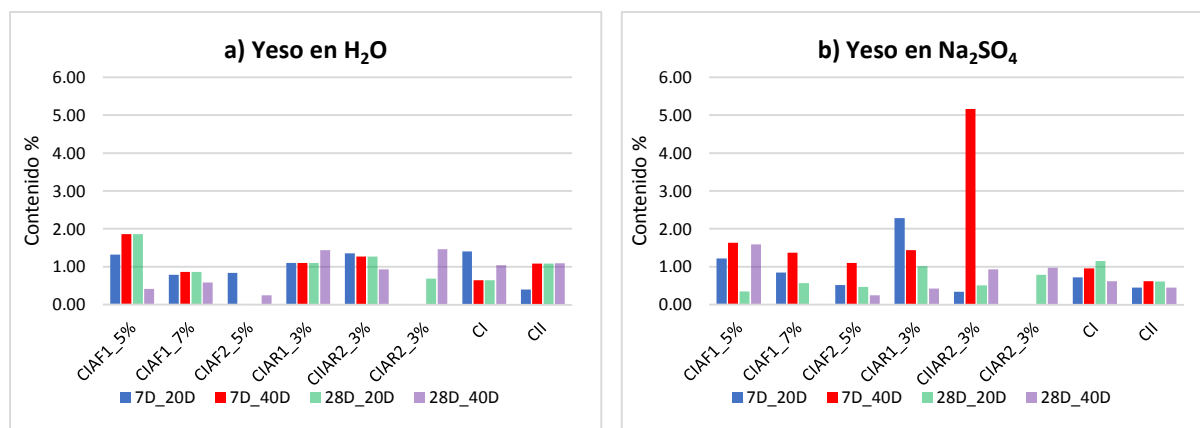


Figura 4.25 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de yeso: a) Inmersa en H_2O b) Inmersa en Na_2SO_4

El contenido de yeso en las muestras sumergidas en agua [Fig. 4.25a] y en sulfatos [Fig. 4.25b] generalmente se observa por debajo de un 2%, a excepción de las familias CIAR1_3%_7D y CIAR2_7D. La familia CIAR1_3%_7D presenta dos veces más contenido de yeso sumergida en sulfatos que en agua, mientras en la familia CIAR2_7D la diferencia es del triple. Ambas familias poseen acelerantes ricos en álcalis (AR) y presentan menor tiempo de hidratación antes de la exposición. El contenido yeso de la familia CIAR2_7D resalta sobre las otras muestras en sulfato teniendo hasta 5 veces más

yeso (5 %) que el promedio general (1 %). El contenido de yeso en mezclas las mezclas convencionales no muestra diferencia considerable en agua o en sulfatos.

Finalmente, las muestras con exposición temprana desarrollan mayor contenido de yeso al igual que etringita, posiblemente debido a que las muestras aún no han alcanzado su máxima cohesión. En función al tipo de acelerante, nuevamente los AR presentan la mayor producción de yeso, esto puede ser consecuencia de su alta reactividad.

4.7.3 Porcentaje de portlandita.

En este apartado se analizan los contenidos de portlandita obtenidos en las muestras sumergidas tanto en agua como en sulfatos en periodos de 20 y 40 días de inmersión [Fig. 4.25].

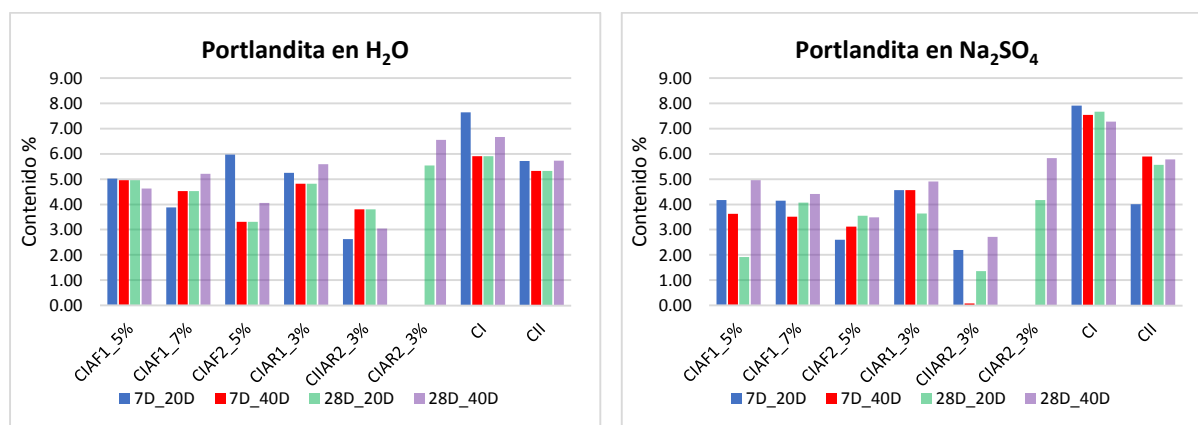


Figura 4.26 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de Portlandita: a) Inmersa en H₂O b) Inmersa en Na₂SO₄

Tanto las muestras inmersas en agua [Fig. 4.26a] como las muestras inmersas en sulfatos [Fig. 4.26b] presenta contenidos de Portlandita (Ca(OH)₂) similares. Los valores de CH en los especímenes en agua se presentan más estables y constantes que los de sulfato en función de su diferencia entre periodos de medición. Los porcentajes más altos de CH tanto en agua como en sulfato son presentados por las muestras sin acelerantes. En ambas el mayor contenido de CH lo presenta el CI_7D con casi 8 % en ambas soluciones. En el 50% de las muestras en agua [Fig. 4.26a] con 7 días de curado el contenido de CH disminuye de 20 a 40 días de inmersión, al mismo tiempo lo inverso sucede con el 75 % de las muestras con 28 días de curado. El 50% de las muestras en sulfato con 7 días también aumenta su contenido de CH, al igual que el 75 % de las muestras con 28 días de curado. Lo que llama la atención es el bajo contenido de CH en la CIIAR2_3%, en especial en la disminución de 2% de CH de un periodo al otro en las muestras con 7 días de curado. Esto podría interpretarse como la reacción del CH con los iones de sulfato para formar yeso o con fase de calcio aluminato para formar etringita.

Se termina recalando la falta de portlandita en la familia que presenta mayor cantidad de yeso y etringita. Esto podría interpretarse como la reacción del CH con los iones de sulfato para formar yeso o con fase de calcio aluminato para formar etringita. De esta forma se explicaría el deterioro acelerado de estas familias, pues sus picos de materiales expansivos coinciden con el tiempo de deterioro.

4.7.4 Porcentaje de fase AFm.

A continuación, se expone la cantidad de fase AFm que presentan las muestras ensayadas por medio de DRX y posteriormente analizadas con Rietveld [Fig. 4.26]. Las AFm son importantes debido a que pueden reaccionar con los sulfatos para formar etringita directamente.

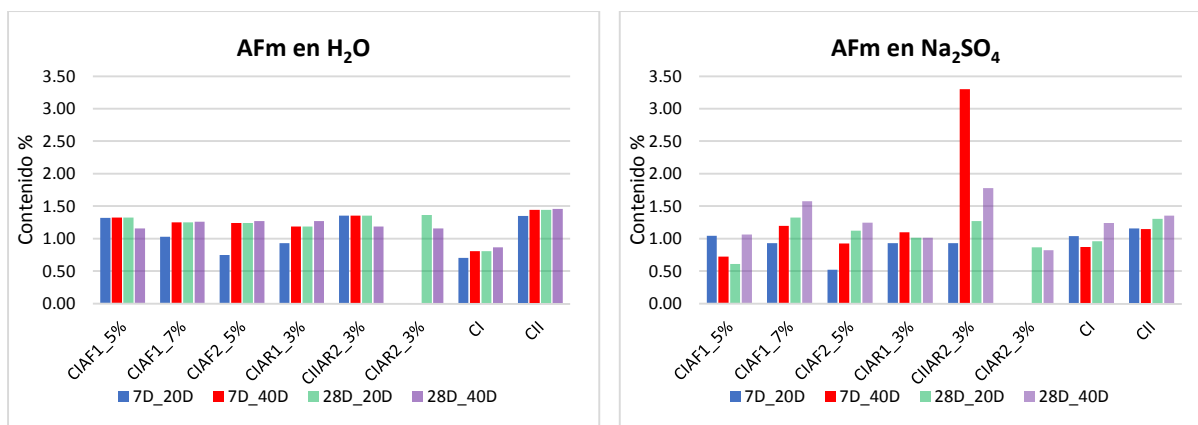


Figura 4.27 Análisis cuantitativo DRX-Rietveld contenido de AFm: a) Inmersa en H₂O b) Inmersa en Na₂SO₄

La fase AFm es la que tiene menor presencia porcentual entre los componentes estudiados. Todos los especímenes sumergidos en agua [Fig. 4.23a] presenta menos de 1.5 % de AFm. La composición de las muestras con diferentes acelerantes sumergidas en agua es relativamente parecida, pero en las muestras sin acelerante el comportamiento es completamente diferente. El cemento CI es el que presenta las menores cantidades de AFm con 0.70 % mientras los CII presentan el mayor porcentaje con 1.46 %. Algo que ambos tienen en común es que conforme pasa el tiempo en ambos se incrementa el contenido de AFm.

De las muestras en sulfatos [Fig. 4.23b] tres familias sobrepasan el 1.50 % de AFm, todas a los 40 días de inmersión, de estas familias dos contienen AR y una AF. La familia con AF que supera este límite es la que contiene mayor porcentaje de acelerante (CIAF1_7%) en sus testigos con 28 días de curado antes de la exposición. Conjuntamente la familia CIIAR2_3% tanto en 7 como en 28 días de curado supera dicho límite. Más del 50 % de las familias restantes inmersas en sulfato presenta un incremento de AFm conforme aumentan los días inmersas. La variabilidad de fase AFm en las muestras inmersas en agua y cemento no presenta una diferenciación significativa, a excepción de la muestra que presenta el deterioro acelerado a los 40 días de inmersión en sulfatos (CIIAR2_3 %).

Para concluir, todas las muestras inmersas tanto en agua como en Na₂SO₄ exponen la formación de etringita, yeso, AFm, Portlandita, con porcentajes generales similares. Diferentes autores (Senhadji et al., 2010) proponen que la cantidad de Portlandita (CH) en las muestras puede transformarse en yeso, mientras permanezcan en la solución de sulfato. Esto puede haber sucedido en la familia cuyo análisis de DRX coincide con su etapa final de deterioro. Esta familia presenta el porcentaje más bajo de portlandita, acompañado de los porcentajes más altos de AFm, yeso y posterior etringita formados a los 40 días de inmersión (Kim et al., 2008). Estos bajos niveles de portlandita y los resaltantes niveles de etringita y yeso al compararlos con las otras muestras impulsan la idea de la transformación del CH en materiales expansivos (Lee et al., 2009; Ryou et al., 2015). En resumen, la combinación de un contenido de alto contenido de etringita, yeso y AFm, asociados con un bajo contenido de Portlandita podrían estar asociados al deterioro (Lee et al., 2009) y posterior expansión (Tian & Cohen, 2000) de la mezcla proyectada. Esta conclusión adquiere más peso cuando se considera que estos altos porcentajes de material expansivo se registran en el periodo donde las muestras presentaron una completa desintegración de sus especímenes producto del ASE acelerado.

5 CAPITULO. CONCLUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 CONCLUSIONES GENERALES.

A partir del estudio experimental realizado en esta tesis de máster se ha podido evaluar la influencia del ASE acelerado en la durabilidad de mezclas proyectadas. En este estudio se comprobó la influencia de distintas variables como son: distintos periodos de exposición, distintos tipos de cemento, distintos tipos de acelerantes y diferentes dosificaciones de un mismo acelerante, en el comportamiento de las mezclas frente al ASE acelerado. De las variables analizadas se determinó que la variable más influyente en la durabilidad de las mezclas proyectadas expuestas a ASE es el tipo de acelerante utilizado, seguido del tiempo en que las mezclas entran en contacto con los sulfatos. La porosidad y resistencia a compresión fueron variables alternativas que sirvieron para la evaluación. El ASE es un fenómeno que se produce por difusión, es por eso que la porosidad es un factor importante. Las muestras más afectadas presentan un alto porcentaje de porosidad lo que aumenta la interacción con los sulfatos y tienden a presentar mayor expansión, el cual puede producir el deterioro de las muestras.

5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.

A continuación, se exponen las conclusiones que dan respuesta a los objetivos específicos planteados para poder realizar la evaluación. Estos producen resultados que apoyan algunos conocimientos generales de los mecanismos de daño causados por los sulfatos en materiales a base de cemento, pero obtenidos en mezclas proyectadas. Esto es importante debido a que la matriz de las mezclas proyectadas es inherentemente menos homogénea que en las mezclas ordinarias debido a la tecnología de proyección. Por ende, presenta mayor porosidad, diferente interacción con el acelerante y una inferior interfaz entre árido y mezcla.

5.2.1 Investigación literaria sobre mezclas proyectadas, su fabricación, formas de aplicación y su comportamiento frente a ataques por sulfatos.

Se realizó una revisión de la literatura referente a los aspectos generales de las mezclas proyectadas, los aditivos acelerantes, su durabilidad y comportamiento frente a AS. Producto de esta investigación se ha podido observar que pese a la gran evolución tecnológica que posee la técnica, los estudios referentes a su exposición frente a AS son prácticamente nulos. Razón por la cual investigaciones como ésta son tan importantes, pues generalmente se utiliza en ambientes con alto potencial de interacción con sulfatos.

5.2.2 Proceso de producción de muestras de mezclas proyectadas.

Se aplicó de forma eficiente la técnica de proyección húmeda, de esta resalta su sencillez cuando se cuenta con personal técnico con experiencia. Para su correcta aplicación se recomienda garantizar la trabajabilidad del material durante todo el proceso de producción y proyección. Además, se recomienda garantizar el control del flujo de entrada de acelerante, para garantizar la homogeneidad de la mezcla proyectada.

5.2.3 Seguimiento del comportamiento físico y químico del mortero proyectado expuesto al ASE acelerado.

El seguimiento realizado a lo largo de 23 semanas de inmersión expone que las muestras sumergidas en agua, no exhiben ningún tipo de deterioro a nivel macroscópico y microscópico (Inspección visual, expansiones, ultrasonidos y DRX). Al mismo tiempo, las muestras en sulfato presentan deterioro el cual tiende a aumentar en función del tiempo de inmersión.

5.2.4 Influencia de la edad de exposición en el avance de la reacción sulfática.

Al haber estudiado la influencia de la edad de exposición en el avance de la reacción sulfática, se observa que el porcentaje de expansiones es más elevado en muestras con edad de 7 días previo a la exposición que con edad de 28 días. Sin embargo, los daños en las muestras no necesariamente son mayores en mezclas con porcentaje de expansión más altos. Por lo que se genera la contradicción de que las muestras con mayor porcentaje de expansión y menor edad previo a la exposición (7 días), generalmente poseen el mismo nivel de daño que las muestras con mayor edad previo a la exposición y menor porcentaje de expansión (28 días).

El hecho de que las muestras de 7 días presenten mayor expansión puede ser debido a que los sulfatos entran con mayor facilidad en su matriz cementícea por presentar mayor porosidad que las muestras con edad de 28 días previos a la exposición. Además, debido a su menor edad antes de la exposición presentan menos cohesión, por lo que los sulfatos pueden encontrar más productos para activar sus reacciones químicas las cuales generan más material de expansión. Las muestras con 7 días pueden ser más flexibles, es decir presenta un mejor comportamiento elástico, lo que permitiría mejor acomodación de los productos expansivos en su matriz cementícea resultando en una reducción del daño por expansión. Pero al analizar las muestras deterioradas, es indiscutible que aun cuando las muestras con edad de 7 días presentan porcentajes de expansión más altos antes de su degradación su tiempo bajo ataque es menor que en las muestras con edad de 28 días antes de la exposición. Por

ende, se concluye que mientras más joven sea la muestra sometida al ASE, esta puede presentar mayor flexibilidad para acomodar material expansivo, pero menor durabilidad.

5.2.5 Desempeño de mezclas proyectadas sometidas al ASE acelerado en función del tipo de cemento empleado.

En el tiempo en que se desarrolla este estudio no se obtuvieron resultados conclusivos sobre la influencia del tipo de cemento utilizado en el avance de la reacción sulfática. Los resultados son más definidos por el tipo de acelerante que por el tipo de cemento, haciendo del tipo de cemento una variable secundaria. Por lo que no necesariamente los cementos analizados protegen en contra del deterioro por ASE acelerado

5.2.6 Mezclas proyectadas con acelerantes ricos en álcalis, libres de álcalis y mezclas convencionales sin acelerantes bajo un ASE acelerado.

Cuando se comparan las muestras dependiendo del tipo de acelerante utilizado, o sea AR y AF en conjunto con las mezclas convencionales sin acelerante, se identificó que la variable principal que influye en el avance de la reacción sulfática es el tipo de acelerante utilizado. El análisis cuantitativo (DRX) indica que el uso de acelerantes genera más etringita estén sumergidos en agua o sulfatos, producto de la interacción entre la portlandita liberada en el proceso de hidratación y la base química de los acelerantes. Los resultados sugieren que los especímenes con acelerantes fueron más susceptibles al deterioro por ASE acelerado. El deterioro más pronunciado se observó en las muestras con AR con mayor porosidad, seguidos de los AF expuestos a la solución con 30 g/l de sulfato de sodio, mientras las muestras sin acelerante no presentaron deterioro físico.

Las muestras con acelerantes AR evaluadas resultaron ser las más vulnerables al ASE acelerado lo que resultó en la degradación del 60 % de los especímenes analizados. Esto puede ser debido a que los AR son acelerantes basados en aluminatos alcalinos y es conocido que los aluminatos reaccionan con el sulfato de sodio creando material expansivo. Esta reactividad fue observada al analizar la microestructura de las muestras con AR que han sido completamente destruidas. Estas muestras reflejan los porcentajes más bajos de portlandita, con los niveles más altos de AFm, yeso y portlandita lo que puede significar la transformación de los CH y AFm en material expansivo. Estos altos porcentajes de etringita, yeso y AFm combinado con la baja portlandita podrían ser el mecanismo de expansión, agrietamiento y posterior desintegración producto del ASE acelerado.

En el mismo contraste las muestras con acelerantes AF presentan mayor resistencia al ASE acelerado, donde el 50 % de sus especímenes aun no expone ningún tipo de daño. El otro 50 % de sus muestras solo presenta daño superficial luego de 23 semanas de inmersión exhibiendo más durabilidad que las muestras con AR. Esta mayor durabilidad frente al ASE acelerado es atribuida a su distinta base química que, aunque también incluye aluminatos, presentan una relación aluminato/sulfato más equilibrada y es menos propenso a crear material expansivo.

Las muestras de mortero no proyectado y sin acelerante, luego de 23 semanas de exposición no presentan ningún tipo de deterioro. Esto puede ser debido a múltiples razones, por ejemplo, poseen el porcentaje de porosidad más bajo debido a que no tienen la introducción extra de aire que caracteriza la técnica de proyección. El AS es un fenómeno por difusión, como estas mezclas presentan menor porosidad, presentan mejor cohesión lo que implica mayor dificultad para el transporte de sulfatos en su matriz cementícea. Este tipo de mezcla tampoco tiene aditivos químicos extra que

reaccionen con los sulfatos, por lo que el ASE dependen primordialmente del contenido de C_3A del tipo de cemento, lo que dificulta la reacción expansiva.

5.2.7 Comportamiento de mezclas con distintas dosificaciones de acelerantes libres de álcalis bajo ASE acelerado.

Luego de 23 semanas expuestas a un ASE acelerado, las distintas dosificaciones de AF presentan un comportamiento similar. A nivel microscópico químico las muestras con 7 % presentan mayor contenido de materiales expansivos que las muestras con 5 % de AF. Pero, sus porcentajes de expansión fueron relativamente iguales del orden de 0.62 ‰. La única diferencia considerable que presenta se da a nivel macroscópico donde el 50 % de las muestras con 7 % no presentan ningún tipo de deterioro, mientras todas las muestras con 5 % si lo hacen. Se debe destacar que el deterioro presentado por ambas dosificaciones es muy superficial, por lo que no se puede determinar con seguridad cuál dosificación es más eficaz frente a un ASE.

5.3 RECOMENDACIONES.

Para finalizar se proponen las siguientes recomendaciones orientadas fundamentalmente en garantizar la durabilidad a la hora de y/o evaluar mezclas proyectadas en ambientes ricos en sulfatos:

- Continuar esta evaluación por el mayor tiempo posible, incorporando más estudios de DRX, lo que permitirá relacionar mejor el estado físico y químico del deterioro provocado por el ASE acelerado en morteros con distintos tipos de acelerante y si ciertamente resulta inefectivo en muestras sin acelerante.
- Tratar de asegurar un buen proceso de proyección para evadir altos porcentajes de porosidad pues estuvieron directamente relacionados con el acelerado deterioro producto del ASE en las muestras que se desintegraron.
- Es evidente que, en el periodo de tiempo evaluado, las mezclas con acelerante presenta vulnerabilidad al ASE, mientras las muestras sin acelerante no. Pero en relación al daño se recomienda evitar los acelerantes ricos en álcalis pues exhibieron menor durabilidad al ASE, además suponen un riesgo potencial para la salud y mayor impacto ambiental.
- Se recomienda la aplicación de la norma ASTM C1012 como se realiza en este experimento, con un pH controlado (≤ 11) con flujo de líquidos continuo y temperatura ambiente en conjunto con las técnicas de seguimiento secundarias para evaluar mezclas proyectadas.
- Se recomienda que los estudios se hagan a edades representativas de la realidad del uso de las mezclas proyectadas. En el caso de mezclas convencionales quizás tiene sentido realizarla luego de 28 días, pero en mezclas proyectadas se deber realizar lo antes posibles si el interés es realmente evaluar el alcance del ASE.

5.4 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

A pesar de los avances obtenidos con esta evaluación, aún existe un amplio espacio de investigación relacionado con las mezclas proyectadas en ambientes con altos contenidos de sulfatos. Por esta razón se hace la sugerencia de las siguientes líneas de investigación:

- Si se vuelve a realizar una investigación como ésta se debe realizar un monitoreo durante un periodo de tiempo más prolongado.
- En futuras investigaciones, considerar distintas dosificaciones de sulfatos y mantener niveles de pH diferentes. Incorporar un seguimiento de las características físicas y mecánicas del material (densidad, masa, porosidad y resistencia) a lo largo del ensayo. Además de ensayos a nivel nanométrico como la microscopia electrónica de barridos, en conjunto con las técnicas ya utilizadas.
- Realizar campañas de investigación considerando la interacción de mezclas proyectadas con otros tipos de sulfatos como el sulfato de magnesio. Además, considerar otras variables en función de las condiciones de contorno, por ejemplo, otras temperaturas de exposición.
- Evaluar la aplicabilidad en mezclas proyectadas de los modelos numéricos diseñados para evaluar el avance de la reacción sulfática interna en las mezclas convencionales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHE. (2002). *Hormigones de Ejecución Especial (seis tipos)*. Madrid: Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, ACHE.
- Aenor. (2005). UNE-EN 196-1:2005 " Métodos de ensayos en cementos. Determinación de la Resistencia Mecánica.
- AENOR. (2006). UNE-EN 12504-4 (Hormigón - Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico).
- Al-amoudi, O. S. B. (2002). Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments, 24, 305–316.
- ASA. (2012). Shotcrete (Speed, Versatility, Cost Savings, Sustainability). *American Shotcrete Association*.
- ASTM C 642. (2006). C642-Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete 1, (3), 6–8.
- ASTM C1012. (2004). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a, 3–8.
- Austin, S. (2002). Sprayed concrete technology, 44(0), 300.
- Bellmann, F., Mo, B., & Stark, J. (2006). Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen, 36, 358–363. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.04.006>
- Blanco Alvarez, F. (n.d.). Capítulo 3. HORMIGÓN ARMADO PROYECTADO VS HORMIGÓN (pp. 51–78).
- Bonakdar, A., Mobasher, B., Pr, Â. Â., & Pr, Â. Â. (2010). Multi-parameter study of external sulfate attack in blended cement materials. *Construction and Building Materials*, 24(1), 61–70. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.009>
- BRE. (2003). BRE Special Digest 1, Concrete in Aggressive Ground, Parts 1 – 4, second edition, BRE Centre for Concrete Construction and Centre for Ground Engineering Remediation.
- Brown, P., & Taylor, H. (1999). The role of ettringite in external sulfate attack. In J. Marchand & J. Skalny (Eds.), *Materials science of concrete: sulfate attack mechanisms*. Westerbork (OH): American Ceramic Society.
- Brux, G. (2009). Dauerhaftigkeit vom Spritzbeton mit erhöhtem Sulfatgehalt beim Einsatz alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger, 104, 63–64. <http://doi.org/10.1002/best.200808234>
- BS 1881. (1983). *Testing concrete. Method for determination of the compressive strength of concrete cores*. London.
- CEMOLINS. (2009a). EN 197-1 - CEM I 52,5 R (Vol. 1). Retrieved from http://www.cmi.cemolins.es/cm/cmi_nd/pdf/castellano/Ficha Super Dragon castellano.pdf
- CEMOLINS. (2009b). EN 197-1 - CEM II / A-L 42 , 5 R (Vol. 01). Retrieved from http://www.cemolins.es/cm/cmi_nd/pdf/ingles/Ficha Dragon AL ingles.pdf
- Clifton, J. R., & Pommersheim, J. M. (1994). *Sulfate attack of cementitious materials, volumetric relations and expansions.pdf*. Lewisburg.
- COGUANOR. (2012). COGUANOR NTG 41017 h17 - Método de ensayo. Determinación de la velocidad

- del pulso ultrasónico a través del concreto., (502).
- Collepari, M. (2003). A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, 25, 401–407. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00080-X](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00080-X)
- Collomix. (2010). Ersatzteilliste Spare Parts List Liste de pièces détachées.
- Cortes Gomez, J. G. (2002). Materiales para ingeniería civil, 148.
- CRISON. (2008). *pH-meter Basic 20. Julho*. Retrieved from http://www.crison.it/pdfs_en/basic_20.pdf
- de Almeida, I. R. (1991). Resistance of High Strength Concrete to Sulfate Attack: Soaking and Drying Test. *International Concrete Abstracts Portal*, 126, 1073–1092.
- De Gonzáles, M. (1991). Exposición en el ciclo organizado por el ACI , Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto.
- DePuy, G. W. (1994). Chemical resistance of concrete. In *Concrete and Concrete—Making Materials* (pp. 263 – 281). Philadelphia: ASTM STP 169C. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=waJhxne7K1MC&oi=fnd&pg=PA263&dq=G.W.+DePuy,+Chemical+resistance+of+concrete&ots=7OY0WL8HLC&sig=Pjltu8XlpD60Q-ZijH5wzS4Mqa0#v=onepage&q=G.W.DePuy%2CChemicalresistanceofconcrete&f=false>
- Dinoia, T. P., & Sandberg, P. J. (2004). Alkali-free shotcrete accelerator interactions with cement and admixtures, 137–144.
- Drimalas, T., Clement, J. C., Folliard, K. J., Dhole, R., & Thomas, M. D. A. (2011). Laboratory and Field Evaluations of External Sulfate Attack in Concrete, 7, 190.
- Efnarc. (1999). Execution of spraying. *Concrete*, 44(0).
- Eglinton, M. (1998). *Resistance of Concrete to Destructive Agencies. Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (Fourth Edi). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.50019-9>
- EHE-08. (2008). *EHE-08, Introduccion de Hormigon Estructural*.
- Galobardes Reyes, I. (2009). *Estudio relativo a la caracterizacion de aditivos acelerantes para hormigon proyectado por via humeda*.
- Galobardes Reyes, I. (2013). *Characterization and control of wet-mix sprayed concrete with accelerators*.
- Galobardes Reyes, J. (2011). Estudio relativo a la caracterización del hormigón proyectado por vía húmeda a tempranas edades.
- Garzón Pire, W. (2013). Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregado reciclado.
- Gedeon, G. (2005). Introduction to Shotcrete Applications, (877).
- Glasser, F. P., Marchand, J., & Samson, E. (2008). Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, 38, 226–246. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.015>
- GONZÁLEZ NERGA, F. (2008). *Determinación experimental del coeficiente de convección y el factor de fricción de un intercambiador de placas*. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID.
- Goodier, C. I. (2000). Wet-Process sprayed mortar and concrete for repair.
- Grübl, P., & Rübl, M. (1998). GERMAN COMMITTEE FOR REINFORCED CONCRETE (DAFSTB) - CODE: CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES. In *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, London, UK on 11 –*.

- Hagelia, P. (2011). Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels.
- Harris, a. W., Manning, M. C., Tearle, W. M., & Tweed, C. J. (2002). Testing of models of the dissolution of cements - Leaching of synthetic CSH gels. *Cement and Concrete Research*, 32(5), 731–746. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00748-7](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00748-7)
- HBM. (2007). *SuperGlue X60*.
- HBM. (2015a). *Data Sheet X60 A*.
- HBM. (2015b). *Data Sheet X60 B*.
- Hewlett, P. C. (2004). *Lea 's Chemistry of Cement and Concrete*.
- Hidalgo, A., Petit, S., Domingo, C., Alonso, C., & Andrade, C. (2007). Microstructural characterization of leaching effects in cement pastes due to neutralisation of their alkaline nature Part I : Portland cement pastes, 37, 63–70. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.002>
- Ikumi Montserrat, T. (2013). *Desarrollo de un modelo de ataque sulfático externo para estructuras enterradas*.
- Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., & Menéndez, G. (2010). Cementos con Material Calcáreo : Formación de Thaumasita por Ataque de Sulfatos, 63–73.
- Jolin, M., Melo, F., Bissonnette, B., Power, P., & Demmard, E. (2015). EVALUATION OF WET-MIX SHOTCRETE CONTAINING SET-ACCELERATOR AND SERVICE LIFE PREDICTION.
- Kim, N., Park, Y., & Lee, Y. (2008). CHARACTERIZATION OF deterioration ON THE shotcrete lining IMMERSSED IN VARIOUS SULFATE SOLUTIONS. In *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* (pp. 847–852). Nanjing: Proccedings of the 2nd International conference GEDMAR 08, Nanjing, China.
- Lee, S. T., Kim, D. G., & Jung, H. S. (2009). Sulfate Attack of Cement Matrix Containing Inorganic Alkali-free Accelerator. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 13(1), 49–54. <http://doi.org/10.1007/s12205-009-0049-0>
- Lipus, K., & Puntke, S. (1996). Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone Sulfate resistance of concretes with different compositions, 169–180.
- Londoño Gómez, E. (2014). LO QUE DEBES SABER SOBRE EL ATAQUE DE SULFATO EN EL CONCRETO. Retrieved from <http://blog.360gradosenconcreto.com/lo-que-debes-saber-sobre-el-ataque-de-sulfato-en-el-concreto/>
- Lootens, D., Lindlar, B., & Flatt, R. J. (2008). Some peculiar chemistry aspect of shotcrete accelerators. In *Proceedings of the 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites*.
- Matos Martínez, J. (2013). Estudio de las variables en el proceso de producción de morteros con acelerante de fraguado.
- Matschei, T., & Glasser, F. P. (2008). The role of sodium sulfate in sulfate attack,, in press. *Materials and Structures*, 38.
- Mayers Group. (2009). The DEMEC mechanical strain gauge. England.
- Mehta, P. (1992). «Sulfate attack on concrete - a critical review.». In J. P. Skalny (Ed.), *Materials Science of Concrete III* (pp. 105–130). Westerville: American Ceramic Society.
- Mehta, P. K. (2000). Sulfate attack on concrete separating myths from reality. *International Concrete Abstracts Portal*, 22(8), 57–61.
- Metha, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete microstructure, properties and materials*. USA : Mc. Graw-Hill.

- Mielich, O., & Ötll, C. (2004). Practical investigation of the sulfate resistance of concrete from construction units. *Otto-Graf-Journal*, 15, 135–132.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete 2nd edition* (2nd ed.). New Jersey: Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458.
- Mitutoyo. (2015). Digimatic Indicator ID-C, 4–7.
- Monteiro, P. J. M., Roesler, J., Researcher, P., Kurtis, K. E., & Harvey, J. (2000). Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cements for Caltrans LLPRS Program, (April 2000).
- Morgan, D. R., Neill, J., McAskill, N., & Duke, N. (1987). Evaluation of silica fume shotcrete. In *International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete*. Montreal, Canada.
- Mulenga, D. M., Stark, J., & Nobst, P. (1999). Praxisnahes Prüfverfahren zum Sulfatwiderstand von Beton und Mörtel mit und ohne Flugasche. *Beiträge Zum DafStb – Forschungskolloquium - Bauhaus-Universität Weimar*, 37, 197–207.
- Naik, N. N., Jupe, A. C., Stock, S. R., Wilkinson, A. P., Lee, P. L., & Kurtis, K. E. (2006). Sulfate attack monitored by microCT and EDXRD : Influence of cement type , water-to-cement ratio , and aggregate, 36, 144–159. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.004>
- Neill, R. C. O., Butler, W. B., Cabrera, J. G., Carrasquillo, R. L., Ellis, W. E., Forster, S. W., ... Prusinski, J. R. (2001). ACI 201.2R-01 Guía para la Durabilidad del Hormigón, 1–59.
- Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1275–1296. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.004>
- Ouyang, C., Nanni, A., & Chang, W. F. (1988). Internal and external sources of sulfate ions in portland cement mortar: two types of chemical attack. *Cement and Concrete Research*, 18(5), 699–709.
- Pacheco Ortega, L. G. (2012). Análisis comparativo de los códigos internacionales para hormigón proyectado.
- Paglia, C., Wombacher, F., & Bo, H. (2003). The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems Influence of the temperature on the sulfate attack mechanisms and damage, 33, 387–395.
- Paglia, C., Wombacher, F., Bo, H., & Sommer, M. (2002). An evaluation of the sulfate resistance of cementitious material accelerated with alkali-free and alkaline admixtures Laboratory vs . field, 32, 665–671.
- Proceq SA. (2014). Pundit Operating Instructions.
- Prudêncio, L. R. (1998). Accelerating admixtures for shotcrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 213–219. [http://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)80007-3](http://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)80007-3)
- Ramachandran, I. S. (1990). Accelerators, (ii).
- Rasheeduzzafar, Al-Amoudi, Omar Saeed Baghabra, Abduljauwad, S. N., & Maslehuddin, M. (1994). MAGNESIUM-SODIUM SULFATE ATTACK IN PLAIN AND BLENDED CEMENTS, 6(2), 201–222.
- Rey, A. (2006). *Hormigón Proyectado*. Sika. Madrid: Departamento de Constructoras y Grandes Obras de Sika, S.A.
- Romer, M. (2003). Detachment of Shotcrete Linings due to Long Term Interaction with Ground Water. In *International Seminar The Thaumassite Form of Sulfate Attack of Concrete* (pp. 6–11). Sheffield: Centre for Cement and Concrete, University of Sheffield.
- Rozière, E., Loukili, A., Hachem, R. El, & Grondin, F. (2009). Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1188–1198. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.021>
- Ryou, J., Lee, S., Park, D., Kim, S., & Jung, H. (2015). Durability of Cement Mortars Incorporating

- Limestone Filler Exposed to Sodium Sulfate Solution, 19, 1347–1358.
<http://doi.org/10.1007/s12205-012-0457-4>
- Sarkar, S., Mahadevan, S., Meeussen, J. C. L., Sloot, H. Van Der, & Kosson, D. S. (2010). Cement & Concrete Composites Numerical simulation of cementitious materials degradation under external sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(3), 241–252.
<http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.12.005>
- Schlumpf, J., & Höfler, J. (2006). *Shotcrete in Tunnel Construction*. Sika.
- Schlumpf, J., Höfler, J., & Jahn, M. (2011). *Sika Sprayed Concrete Handbook 2011*. Sika.
- Schmidt, T. (2007). Sulfate attack and the Role of Internal carbonate on the formation of thaumasite, 3853, 165.
- Seabrook, P. T., Chynoweth, G. L., Crom, T. R., Dikeou, J. T., Drudy, W. a, Fredericks, J. C., ... Rogers, E. R. Guide to Shotcrete Reported by ACI Committee 506 (1995).
- Senhadji, Y., Mouli, M., & Khelafi, H. (2010). Sulfate attack of Algerian cement-based material with crushed limestone filler cured at different temperatures, 34, 131–143.
<http://doi.org/10.3906/muh-1003-104>
- Shah, S. P., Wang, K., & Weiss, W. J. (2000). Mix proportioning for durable concrete. *Concr. Int.* 12 (9).
- SIGMA-ALDRICH. (2015a). Ficha De Datos De Seguridad Sodium Sulfate, (1907), 1–7.
- SIGMA-ALDRICH. (2015b). Product Name : Product Number : CAS Number : Formula : Formula Weight : Loss on Ignition Formula : Formula Weight : Na₂O₄S Specification, 1–2.
- Sika. (2011). Data Sheet Sika ® SikaPlast ® T-1120, 221–222.
- Skalny, J., Marchand, J., & Odler, and I. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*.
- Solís Carcaño, R. G., Moreno, É. I., & Castillo Pak, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados.
- Speakman, S. A. (2012). Introduction to PANalytical X'Pert HighScore Plus v3.0, (March), 1–19. Retrieved from <http://prism.mit.edu/xray>
- Spirig, C. (2004). Sprayed concrete systems in the Gotthard base tunnel, 245–249.
- Tae, S., Doug, R., Jung, H., Park, D., & Sik, C. (2008). Effect of limestone filler on the deterioration of mortars and pastes exposed to sulfate solutions at ambient temperature, 38, 68–76.
<http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.003>
- Taylor, H. F. W. (1993). Sulfate Attack Mechanisms. In *Materials Science of Concrete Special Volume* (pp. 33– 34). Ohio: Amer. Ceramic Society.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry, Second edition*. (T. Telford, Ed.). London.
- Teichert, P. (2002). Carl Akeley, A tribute to the founder of shotcrete. *Shotcrete*, 10–12.
- Tian, B., & Cohen, M. D. (2000). Does gypsum formation during sulfate attack on concrete lead to expansion ?, 30, 117–123.
- Tikalsky, P. J., & Carrasquillo, R. L. (1993). Fly Ash Evaluation and Selection for Use in Sulfate-Resistant Concrete. *Materials Journal*, 90(6), 545–551.
- Tittelboom, K. Van, Belie, N. De, & Hooton, R. D. (2013). *Test Methods for Resistance of Concrete to Sulfate Attack – A Critical Review*. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-5413-3>
- Tixier, R., & Barzin Mobasher, M. A. (2003). Modeling of Damage in Cement-Based Materials Subjected to External Sulfate Attack . I : Formulation, 15(August), 305–313.
- UPC, L. de tecnologia d'estructures. Premsa ibertest (2006).

- UPC, W. (2015). Instalación combinada por ensayos de mortero y hormigón. Retrieved from <http://www.upc.edu/sct/es/equip/376/instalacion-combinada-ensayos-mortero-hormigon.html>
- Vandewalle, M. (2005). *Tunnelling is an Art*. NV Bekaert SA. Belgium.
- Wang, J. G. (1994). Sulfate attack on hardened cement paste. In *Cement and Concrete Research* (pp. 735–742). Chinan: Department of Applied Chemistry, Shenzhen University Shenzhen.
- Wittekindt, W. (1960). Sulfatbeständige zemente und ihre prüfung. *Zement-Kalk-Gips*, 13(2), 565–572.
- Yoggy, G. D. (2002). The History of Shotcrete.
- Yubero, E. (2010). *Hormigón proyectado por vía húmeda. Situación actual y nuevas aplicaciones en elementos armados*. Barcelona: UPC.

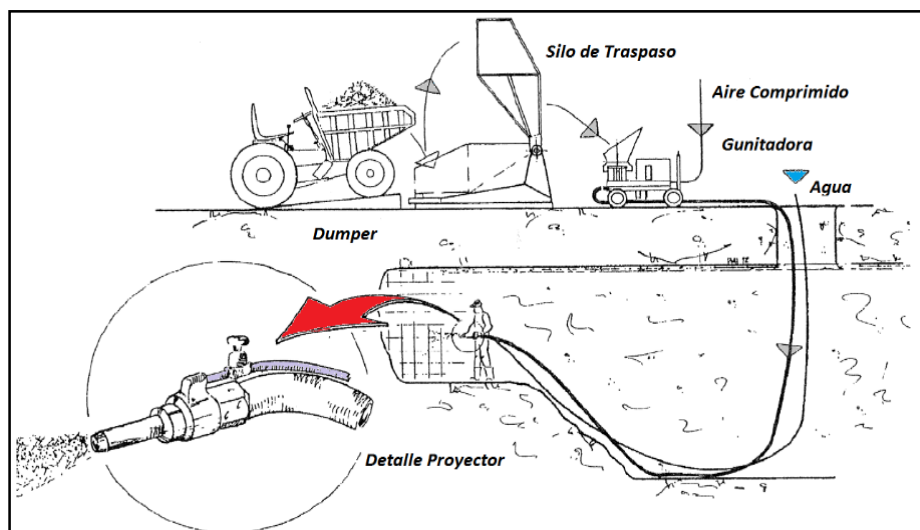
ANEJOS

PREÁMBULO.

Los anejos de este trabajo son presentados según tres clasificaciones distintas: Los anejos A presenta pautas teóricas que se consideran importantes en un segundo plano, para el desarrollo de la investigación; Los anejos B poseen información adyacente sobre los materiales, equipos y la correcta manipulación de los mismo; y por último los anejos C exponen parte de los resultados obtenidos a lo largo del experimento.

ANEJO A1. PROYECCIÓN VÍA SECA.

La proyección vía seca es un procedimiento en el que todos los componentes del hormigón se mezclan previamente a excepción del agua, ésta se añade en la boquilla de la pistola de proyectado antes de proyectar la mezcla, por lo que la mezcla seca se transporta a través de las mangueras neumáticamente hasta llegar a la boquilla [Fig. I].



Anejo Figura I Esquema de Proyección Vía Seca (Dry-Mix) (ACHE, 2002)

De forma mecánica en la proyección por vía seca, los componentes cementicios y los áridos se mezclan en seco en el silo de traspaso, desde donde se dirigen a la tolva de alimentación de la máquina de proyección del sistema rotor. Luego de ésta, por acción del aire comprimido, la mezcla se transporta por manguera hasta la pistola de proyección, donde se agrega agua y aditivo acelerante para la proyección final sobre la superficie de trabajo (Pacheco Ortega, 2012). La ACI 506R-90 y (Rey, 2006), detallan los pasos específicos para la realización de este proceso, como se muestra a continuación:

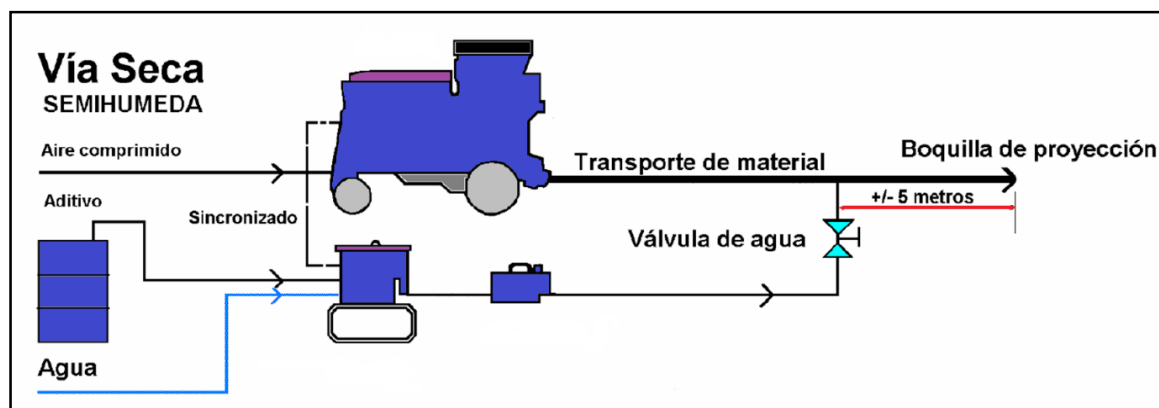
- El cemento y los áridos se mezclan adecuadamente hasta conseguir una perfecta homogeneidad en proporciones variables. Lo normal es usar cemento Portland, sin embargo,

a menudo se emplean cementos especiales, junto con diferentes clases de áridos (artificiales o naturales, de río o machaqueo).

- La mezcla de cemento/áridos se introduce en un alimentador del equipo (junto con acelerante en polvo si se emplea).
- La mezcla es generalmente introducida en la manguera de suministro por un dispositivo de medición tal como un feedwheel, rotor, o un tazón de alimentación (feed bowl). Algunos equipos solo utilizan la presión del aire (orifice feed) para transportar el material en las mangueras.
- El material es transportado mediante aire a presión (flujo diluido) a través de la manguera de entrega hasta una boquilla o pistola especial. El cuerpo de la boquilla está equipado con un distribuidor múltiple perforado, a través del cual se introduce agua a presión (junto con acelerante líquido si se emplea) y se mezcla íntimamente con el conjunto cemento/áridos.
- La mezcla ya húmeda se inyecta desde la boquilla a alta velocidad sobre la superficie soporte que debe proyectarse o gunitarse.

ANEJO A2. PROYECCIÓN VÍA SECA SEMI-HÚMEDA.

Existe una variante conocida como Vía Seca Semi-Húmeda, o simplemente, Vía Semi-Húmeda, el cual es idéntico en sus primeras fases a la mezcla seca. Este sistema difiere en que a una distancia aproximadamente de 4 m o 5 m antes del proyector [línea roja Fig. II] se efectúa la adición de agua y aditivo acelerante directamente en la manguera. Además se deben humedecer los áridos, hasta un 10% lo que mejora las propiedades de la mezcla al llegar a la boquilla, lo que permite obtener un material más homogéneo (Pacheco Ortega, 2012; Rey, 2006).



Anejo Figura II Esquema de Proyección Vía Semi-Húmeda (Rey, 2006)

Otra de las ventajas de este sistema, es que evita el polvo resultante de la proyección, así como la pérdida de cemento en la mezcla al salir de la boquilla. También se puede considerar que el agua añadida se incorpora perfectamente durante esos 5 m a la mezcla, haciéndola más homogénea, y lo que es más importante, que la relación agua/cemento sea adecuada (Rey, 2006).

ANEJO A3. CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO SEGÚN SU VELOCIDAD ULTRASÓNICA.

Velocidad ultrasónica, V (m/s)	Clasificación del concreto
V > 4575	Excelente
4575 > V > 3660	Bueno
3660 > V > 3050	Regular
3050 > V > 2135	Pobre
V > 2135	Muy pobre

Anejo Tabla I Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Solís Carcaño et al., 2004)

ANEJO A4. PRINCIPIOS BÁSICOS DRX.

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica instrumental de caracterización estructural de sólidos, la cual es utilizada para identificar fases cristalinas en muestras sólidas de compuestos químicos o minerales. Es una técnica que se utiliza para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases sólidas cristalinas, tanto orgánicas como inorgánicas, en muestras de polvo, capas finas o cristales de una amplia gama de materiales (minerales, rocas, sedimentos, suelos, partículas atmosféricas, residuos, metales, aleaciones, plásticos, materiales de construcción, productos químicos, productos farmacéuticos, cerámicas, pigmentos, entre otras (INGEOMINAS, 2009; Luisa & García, 2007; Perales Martínez, 2010; Porras, 2010; UHU, 2015). Con el uso del difractómetro de rayos-x. Instrumento que permite irradiar compuestos sólidos con rayos-x para obtener la estructura cristalográfica de los compuestos o minerales que la constituyen. (INGEOMINAS, 2009)

La técnica se basa en la aplicación de la ley Bragg, esta relaciona la distancia interplanar de los compuestos con el ángulo de incidencia de los rayos-x de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Donde:

- λ = Longitud de onda,
- θ = Angulo de incidencia de los rayos-x
- d= distancia interplanar.

Por tanto, es posible medir la distancia entre 2 planos, de la estructura de un mineral, según el ángulo de incidencia de los rayos-x. La combinación de los planos y las distancias entre ellos permite deducir la estructura cristalina del mineral o compuesto. (INGEOMINAS, 2009)

ANEJO A5. CRITERIO DE CHAUVENET.

Se trata de un criterio estadístico para la exclusión de resultados donde algún punto del muestreo realizado pueda parecer cuestionable en comparación con el resto de ellos, ya sea debido a un error de lectura, a una perturbación en la cadena de medida o a la aparición de un fenómeno externo o adicional al fenómeno que se pretende medir. Este criterio da una base consistente para poder tomar la decisión de retener o rechazar este punto. No obstante, se debe estudiar si ese punto es debido a una equivocación y por lo tanto rechazarse o es debido a una causa natural y por lo tanto retenerse (GONZÁLEZ NERGA, 2008).

La aplicación del criterio consiste en el cálculo de un coeficiente de desviación DR para cada punto:

$$DR_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Donde:

- x_i = la medida de cada punto
- \bar{X} = la media
- σ = la desviación estándar

El coeficiente, DR, se comparará con un coeficiente estándar DR_0 , que depende del número de medidas tomadas. Si $DR_i > DR_0$ se podría descartar el punto, en caso contrario se podrá retener. Si se rechaza el punto la media (\bar{X}) y la desviación estándar (σ) estimadas han de recalcularse una vez eliminado el punto (GONZÁLEZ NERGA, 2008).

ANEJO A6. EXPANSIONES MÁXIMAS PERMITIDAS SEGÚN ASTM C1012.

Rango de valores expansivos máximos permisibles		
Número de muestras	cementos mezclados	Cemento Portland
3	34.00 ‰	10.00 ‰
4	37.00 ‰	11.00 ‰
5	39.00 ‰	12.00 ‰
6	41.00 ‰	12.00 ‰

Anejo Tabla II Expansiones máximas a 18 meses

ANEJO B1. CARACTERÍSTICAS DE CEM I 52.5 R.

CEM I 52.5 R	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	98	Mín. 95 - Máx. 100	
Componente Minoritario (%)	2	min. 0 - máx. 5	
Perdida por Calcinación (%)	2.5	Máx. 5.0	Químicas
Sulfato SO ³ (%)	3.4	Máx. 4.0	
Cloruros, CL ⁻ (%)	0.04	Máx. 0.10	
Residuo insoluble (%)	0.7	Máx. 5.0	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	4600	-	Físicas
Expansión de Le Chatelier (mm)	0.5	Máx. 10	
Inicio de fraguado (min)	110	min. 45	
Final de fraguado (min)	170	Máx. 720	
Compresión a 1 día (Mpa)	27	-	Mecánicas
Compresión a 2 días (Mpa)	40	min. 30.0	
Compresión a 7 días (Mpa)	52	-	
Compresión a 28 días (Mpa)	61	min. 52.5	

Anejo Tabla III Características de CEM I 52.5 R (CEMOLINS, 2009a)

ANEJO B2. CARACTERÍSTICAS DE CEM II A-L 42.5 R.

CEM II A-L 42.5 R	Valor habitual	Especificaciones según norma	
Clinker (%)	88	min. 80 - máx. 94	
Caliza (%)	10	min. 6 - máx. 20	
Componente Minoritario (%)	2	min. 0 - máx. 5	
Sulfato SO ³ (%)	3.3	Máx. 4.0	Químicas
Cloruros, CL- (%)	0.01	Máx. 0.10	
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	3900	-	Físicas
Expansión de Le Chatelier (mm)	0.5	Máx. 10	
Inicio de fraguado (min)	120	min. 60	
Final de fraguado (min)	180	Máx. 720	
Compresión a 1 día (Mpa)	13	-	Mecánicas
Compresión a 2 días (Mpa)	25	min. 20.0	
Compresión a 7 días (Mpa)	39	-	
Compresión a 28 días (Mpa)	52	min. 42.5 - máx. 62.5	

Anejo Tabla IV Características de CEM II A-L 42.5 R (CEMOLINS, 2009b)

ANEJO B3. SÚPER PEGAMENTO X60.

El X60 es un adhesivo de 2 componentes de endurecimiento rápido [Fig. III], estos son un líquido (componente B) y uno en polvo (componente A). La función de diseño del adhesivo es la instalación de medidores de deformación. Este se adhiere a todos los metales de uso común y de una serie de sustancias no metálicas como el hormigón, la porcelana, el vidrio, la madera y algunos plásticos (HBM, 2007, 2015a, 2015b).

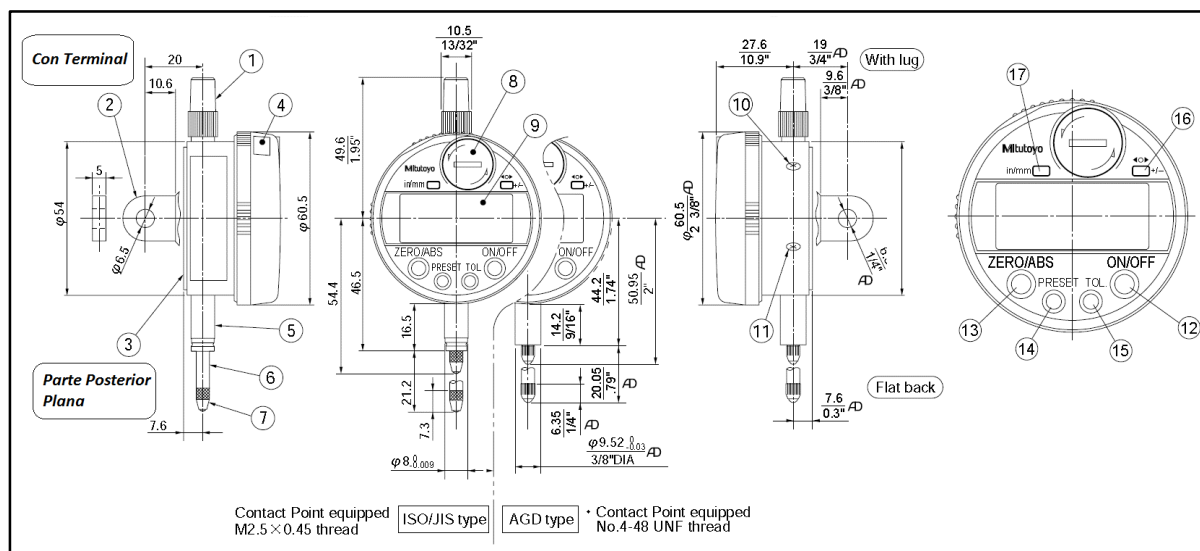


Anejo Figura III Pegamento para medidores de deformación X60 (HBM, 2007)

Conjuntamente con los componentes para formar el pegamento, el kit del producto facilita las herramientas para efectuar la mezcla como son [Fig. III]; cubos de mezclas, cucharas de dosificación, agitadores de madera, entre otros. Sus campos de aplicación típicos son: baja temperatura, materiales porosos, así como para asegurar los cables (HBM, 2007).

ANEJO B4. INDICADOR DIGITAL MITUTOYO ABSOLUTE MODELO ID-C.

El indicador digital que utiliza el equipo es el modelo ID-C de la productora Mitutoyo, en la Figura IV se ofrece un esquema con las características de dicho complemento.








Anejo Figura IV Indicador Digital Mitutoyo Absolute modelo ID-C (Mitutoyo, 2015)

- | | |
|---|--|
| 1. Cap / Tapa | 10. Lever mounting screw / Tornillo de montaje de la palanca |
| 2. Lug / Agarradera | 11. Release mounting hole / Orificio de montaje de lanzamiento |
| 3. Flat back / Parte posterior plana | 12. On/Off ----- Encendido/Apagado |
| 4. Output connector (with rubber cap) / Conector de salida (con tapa de goma) | 13. Zero/ABS |
| 5. Stem / vástago | 14. Preset / Reinicio |
| 6. Spindle / Cabezal | 15. TOL. |
| 7. Contact point / Punto de contacto | 16. +/- |
| 8. Battery cap/ Tapa de batería | 17. in/mm ----- pulgadas/milímetros. |
| 9. LCD / Pantalla LCD | |

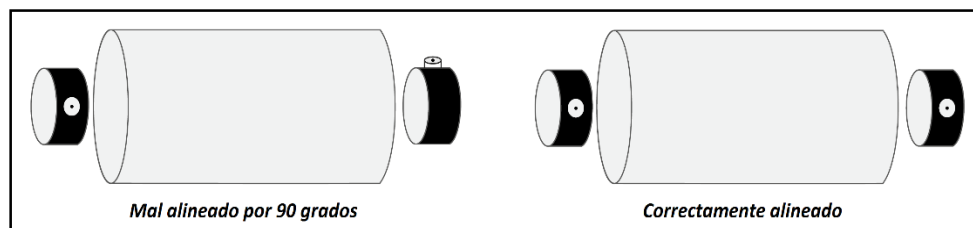
ANEJO B5. EQUIPO DE ULTRASONIDO PUNDIT PL-200, CALIBRACIÓN Y CONTROLES.

Antes de iniciar la obtención de los parámetros a analizar se debe tener claro la forma de calibración del equipo, así como los controles que conforman su interfaz. En la pantalla táctil del Pundit en la figura 3.27 se destacan los controles digitales prioritarios del equipo los cuales se describen a continuación (Proceq SA, 2014):

1. *Nombre del archivo:* Las mediciones guardadas se almacenan con este nombre de archivo. Si varias mediciones se realizan bajo el mismo nombre de archivo, se realizan incrementos sufixos después de cada medición
2. *Modo de medición:* Se selecciona el tipo de medida a realizar, en este caso es el tiempo de transmisión de onda.
3. La esquina superior derecha de la pantalla muestra el transductor de corriente seleccionado (500kHz), el tiempo actual y el estado de la batería.

4. **Ganancia:** ajusta la ganancia del receptor, desde 1x hasta un máximo de 10 000x, en el experimento es de 2x.
5. **Voltaje:** Ajusta el voltaje del transmisor. Para obtener los mejores resultados, lo mejor es comenzar con bajo voltaje transmisor y un ajuste de baja ganancia. A continuación, aumentar hasta que se logre un nivel de señal estable. La saturación de la señal debe ser evitada. Para el análisis se establece una tensión de 50V.
6. **Continuo ∞ / # Transmisión de ráfaga:** ∞ Continúa la transmisión hasta que se pulse el icono de detención. # Registra una medida tan pronto como se detecta una señal estable.
7. **Ajustes:** Introduce al menú de ajustes.
8. **Stop / Guardar:**  Detenga la medición actual.  Guarde la medición actual.  Guarde la serie actual y continuar con la medición.
9. **Inicio / Captura Instantánea:**  Comienza la medición.  Guarde la medición de intensidad como se muestra en la pantalla y continuar medición.
10. **Selección de curso:** Activación automática
11. **Zoom:** Acercar y alejar de la medición actual.

La calibración del equipo inicia con la selección de los transductores los cuales depende del tamaño del agregado y las dimensiones del objeto de prueba, según estas especificaciones se utilizan transductores de 500 kHz [Anejo B6]. Se utiliza este transductor por el diámetro del agregado utilizado. A continuación, se procede con la calibración del equipo utilizando el cilindro de calibración, siendo ésta la medida cero del sistema. Los transductores deben ser perfectamente alineados en los extremos del cilindro de calibración para que no exista desviación de las medidas [Fig. V]



Anejo Figura V Alineación sobre cilindro de calibración (Proceq SA, 2014)

ANEJO B6. PAUTAS PARA SELECCIÓN DEL TRANSDUCTOR DE ULTRASONIDOS.

	Limitaciones de los objetos de prueba			Aplicación
	Longitud de onda	tamaño máximo de agregado	Dimensión lateral mínima	
24 kHz	154 mm	≈ 77 mm	154mm	Concreto: Agregado muy grueso, objetos grandes (varios metros)
54 kHz	68.5 mm	≈ 34 mm	69 mm	Hormigón, Madera, Roca
150 kHz	24.7 mm	≈ 12 mm	25 mm	Material de grano fino, ladrillos refractarios, Roca (núcleos NX)
250 kHz	14.8 mm	≈ 7 mm	15 mm	Material de grano fino, ladrillos refractarios, Roca, muestras pequeñas
500 kHz	7.4 mm	≈ 3 mm	7 mm	Material de grano fino, ladrillos refractarios, Roca. Uso en pequeñas muestras limitadas por el tamaño del transductor

Anejo Tabla V Características de selección del transductor

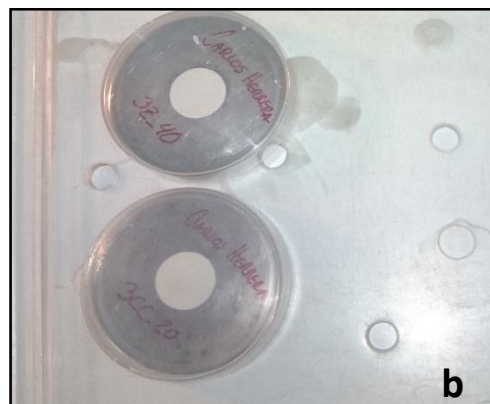
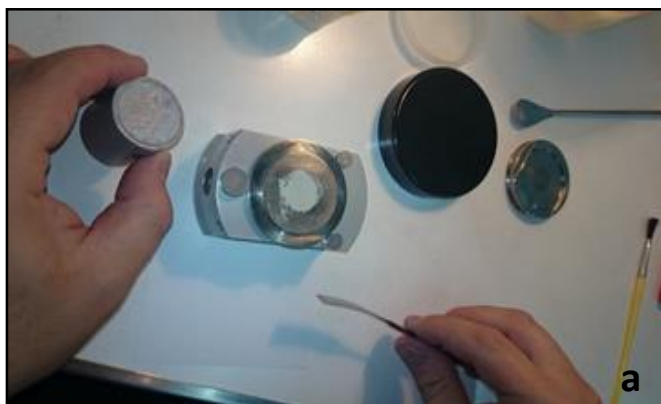
ANEJO B7. COLOCACIÓN DE MATERIAL EN PORTA MUESTRAS DEL DRX.

Esta es la última etapa de preparación de la muestra para ser analizada en los laboratorios de la Universidad de Barcelona. El porta muestras es una herramienta estándar cuyas dimensiones volumétricas de captación de muestra son un diámetro de 16 mm y profundidad de 2.5 mm para una capacidad de muestra añadida al porta muestra de alrededor de 20 gramos. Los pasos precisos para la preparación de la muestra, partiendo del polvo homogéneo, son los siguientes:

- Se coloca el porta muestras de forma invertida sobre la base prensadora.
- Consecuentemente se remueve la parte superior del porta muestras dejando el hueco cilíndrico expuesto.
- Se introduce la muestra en el anillo por el orificio de la placa circular. Seguido se procede a aplanar la muestra mediante el cilindro macizo de acero [Anejo Figura VII a].
- Utilizando una cuchilla y brocha o pincel eliminar los restos de muestra que sobresalen del anillo [Anejo Figura VII a].
- Se coloca nuevamente la parte superior del porta muestra y se retira de la base prensadora.
- Se limpian los equipos utilizados con etanol y se repite el proceso, una vez se tiene todas las muestras estas se colocan sobre una bandeja transparente para que el análisis sea llevado a cabo [Anejo Figura VII b].



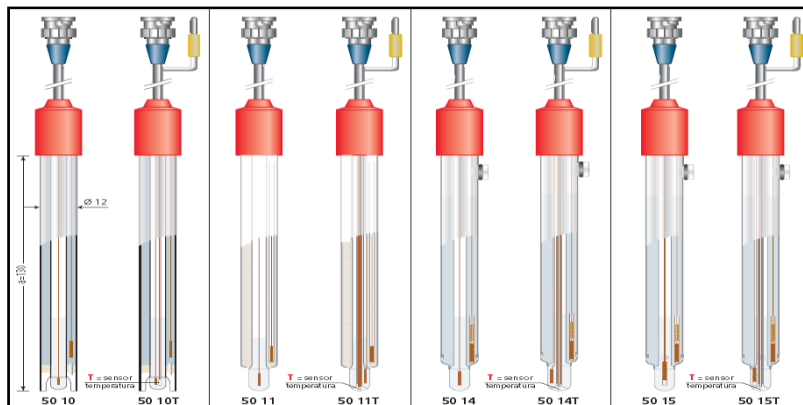
Anejo Figura VI a) Balanza analítica y patrón de TiO_2 rutilo b) Mortero de ágata y muestra homogénea con patrón



Anejo Figura VII a) colocación de material en porta muestra b) Muestras listas para ensayo

ANEJO B8. CALIBRADO DEL EQUIPO CRISON PH METER BASIC 20+.

Para una medida correcta del pH se debe ejecutar una calibración periódica del conjunto instrumento-electrodo con disoluciones tampón. Esto sirve como forma de compensar las desviaciones del potencial de asimetría y la pendiente que el electrodo [Fig. VIII] experimenta en función del tiempo. Al calibrar con disoluciones tampón se corrigen las variaciones de respuestas experimentada por los electrodos (CRISON, 2008).



Anejo Figura VIII Electrodo (CRISON, 2008)

El calibrado de pH según lo indica el manual para usuario del equipo puede realizarse con uno, dos o tres puntos de calibración. Estos parámetros de calibración se almacenan en la memoria del equipo hasta que se realice una nueva calibración. De las formas de calibración descritas, en el experimento se utiliza la calibración de dos puntos, siendo la calibración más habitual. Se utiliza como primer tampón el pH 7.00 y como segundo tampón el pH 4.01. Para esto se deben preparar los frascos calibradores [Fig. IX] llenándolos con un mínimo de 40 ml aproximadamente del tampón correspondiente, con esta cantidad el equipo puede ser calibrado entre 5 y 10 veces (CRISON, 2008).



Anejo Figura IX Tampones de pH (CRISON, 2008)

El pH-Meter BASIC 20+ tiene memorizada una tabla de tampones pH y patrón redox (valores en función de la temperatura) [Anejo B8 Tabla VI]. En esta se pueden observar las diferentes calibraciones a utilizar por el equipo en función de la temperatura y los tampones. Como ya se ha especificado, se utiliza la estabilización con dos tampones a una temperatura de 25 grados Celsius [Tabla VI]. Luego de conocer los pormenores del equipo se debe realizar la calibración del mismo previo a su uso [diagrama de calibración Figura X].

Las disoluciones utilizadas en los tampones CRISON son de tipo técnico y son preparadas según la norma DIN 19267 (Deutsches Institut für Normung “Instituto Alemán de Normalización”), estas son comprobadas con el material de referencia patrón “standard reference material (SRM)” del National Institute of Standards & Technology (NIST), según DIN 19266. Se debe tener siempre presente que los tampones alcalinos se alteran con facilidad cuando entran en contacto con el CO₂ atmosférico, por lo que debe restringirse en lo mayor posible su contacto con el aire para no encontrar variaciones importantes de pH. Entre tampón y tampón debe recordarse siempre limpiar el electrodo, para así evitar la contaminación de las disoluciones alcalinas de los mismos.

°C	pH					mV
0	2.01	4.01	7.12	9.52	11.45	--
10	2.01	4	7.06	9.38	11.2	245
20	2	4	7.02	9.26	11	228
25	2	4.01	7	9.21	10.9	220
30	2	4.01	6.99	9.16	10.81	212
40	2	4.03	6.97	9.06	10.64	195
50	2	4.06	6.97	8.99	10.48	178
60	2	4.1	6.98	8.93	10.23	160
70	2.01	4.16	7	8.88	10.19	142
80	2.01	4.22	7.04	8.83	10.06	--
90	2.01	4.3	7.09	8.79	9.93	--

Anejo Tabla VI Parámetros del Equipo (CRISON, 2008)

En la tabla VII se pueden observar las medidas que pueden ser obtenidas por medio de la utilización del equipo, donde se aprecian los rangos entre los cuales el equipo presenta una gran eficiencia con una precisión de dos dígitos, luego de punto para la medición de pH, siempre y cuando el ensayo se realice bajo las condiciones descritas.

Variables medidas	pH	mV	°C
Escala	-2 @ 16	± 2000	-20 @ 150
Resolución	0.01	1	0.1
Error de medida (± 1 dígito)	≤ 0.01	≤ 1	≤ 0.2
Reproducibilidad (± 1 dígito)	± 0.01	± 1	± 0.1

Anejo Tabla VII Variables medidas (CRISON, 2008)

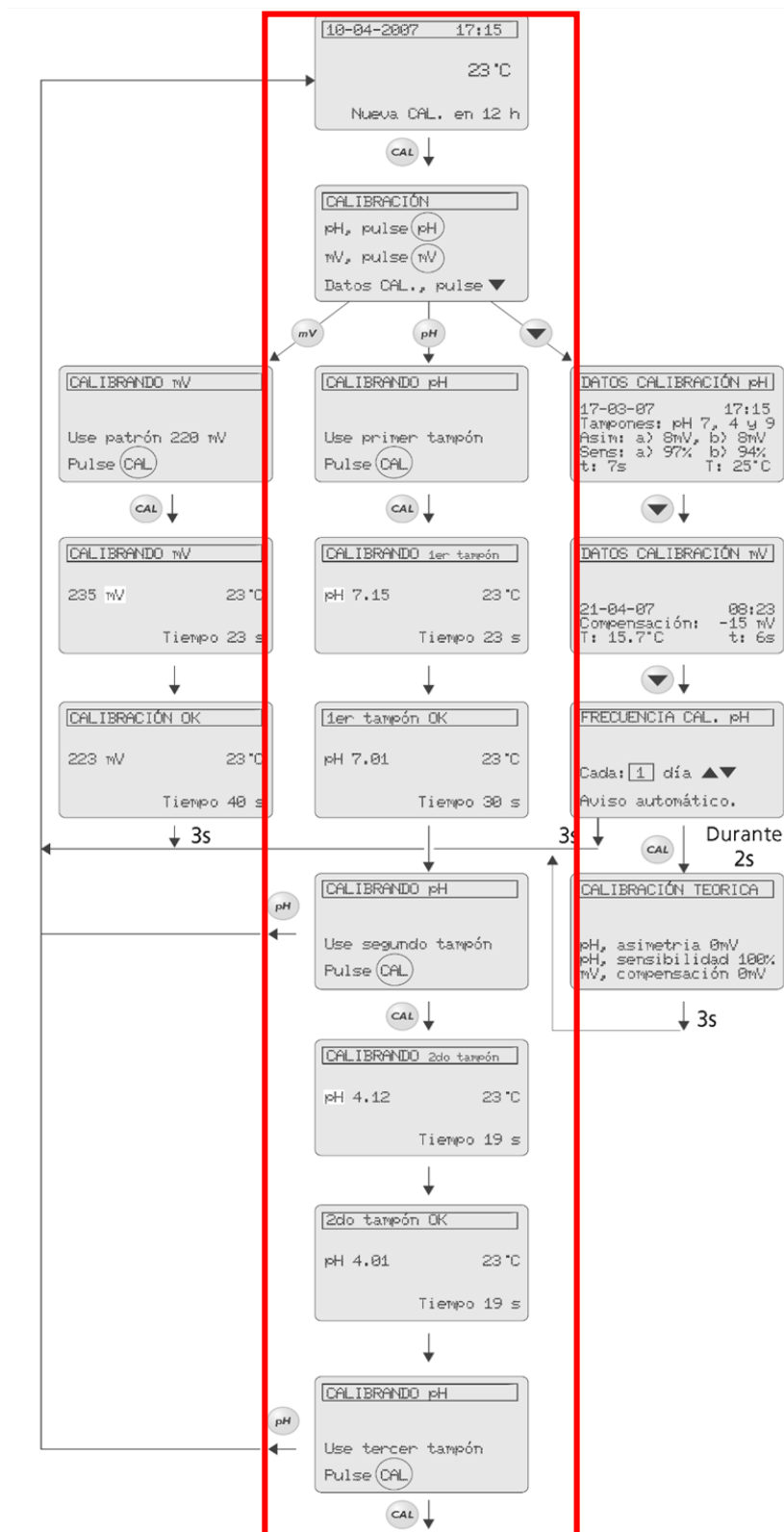
ANEJO B9. MEDIDAS DE pH CON PH-METER BASIC 20+.

Luego de haber calibrado el equipo este permite dos formas de medición: la medida continua donde el instrumento ofrece directamente en pantalla el valor medido por el electrodo en todo momento y la medida por estabilidad donde la lectura no se fija en pantalla hasta que la señal del electrodo varía menos de 0.01 pH (0.5 mV) durante 6 segundos. En el experimento se utiliza la medida por estabilidad.

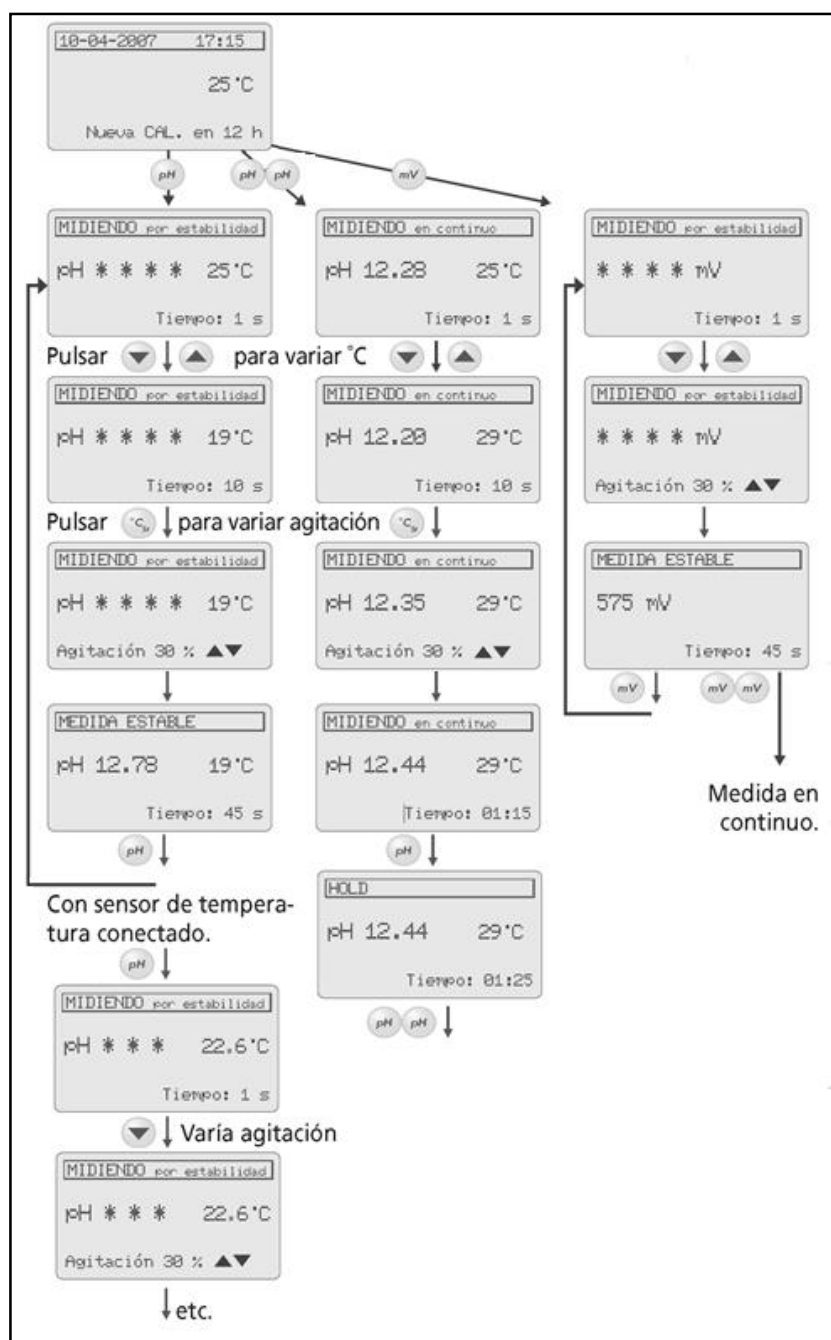
Se debe prestar atención a la resolución de la temperatura debe ser de 1 °C, si se mide sin sensor de temperatura y de 0.1 °C cuando se mide con sensor de temperatura conectado. En el caso del análisis las mediciones se realizan con medidor de temperatura. Al final de cada uso del equipo se debe limpiar el electrodo con pepsina, además entre tomas continuas de diferentes muestras se debe limpiar el electrodo para evitar la contaminación de las muestras entre sí.

La figura XII es un diagrama que muestra el procedimiento exacto a seguir para la manipulación del equipo y la consecuente obtención de las medidas de pH y temperatura de las muestras. El esquema

inicia justo luego de la realización de la calibración [Anejo B8]. En el diagrama de la figura XII la primera ventana es para someter el análisis que se desea obtener, las ventanas consecuentes a estas presentan como el equipo va determinando los valores que se han solicitado y la presentación final de los resultados obtenidos.

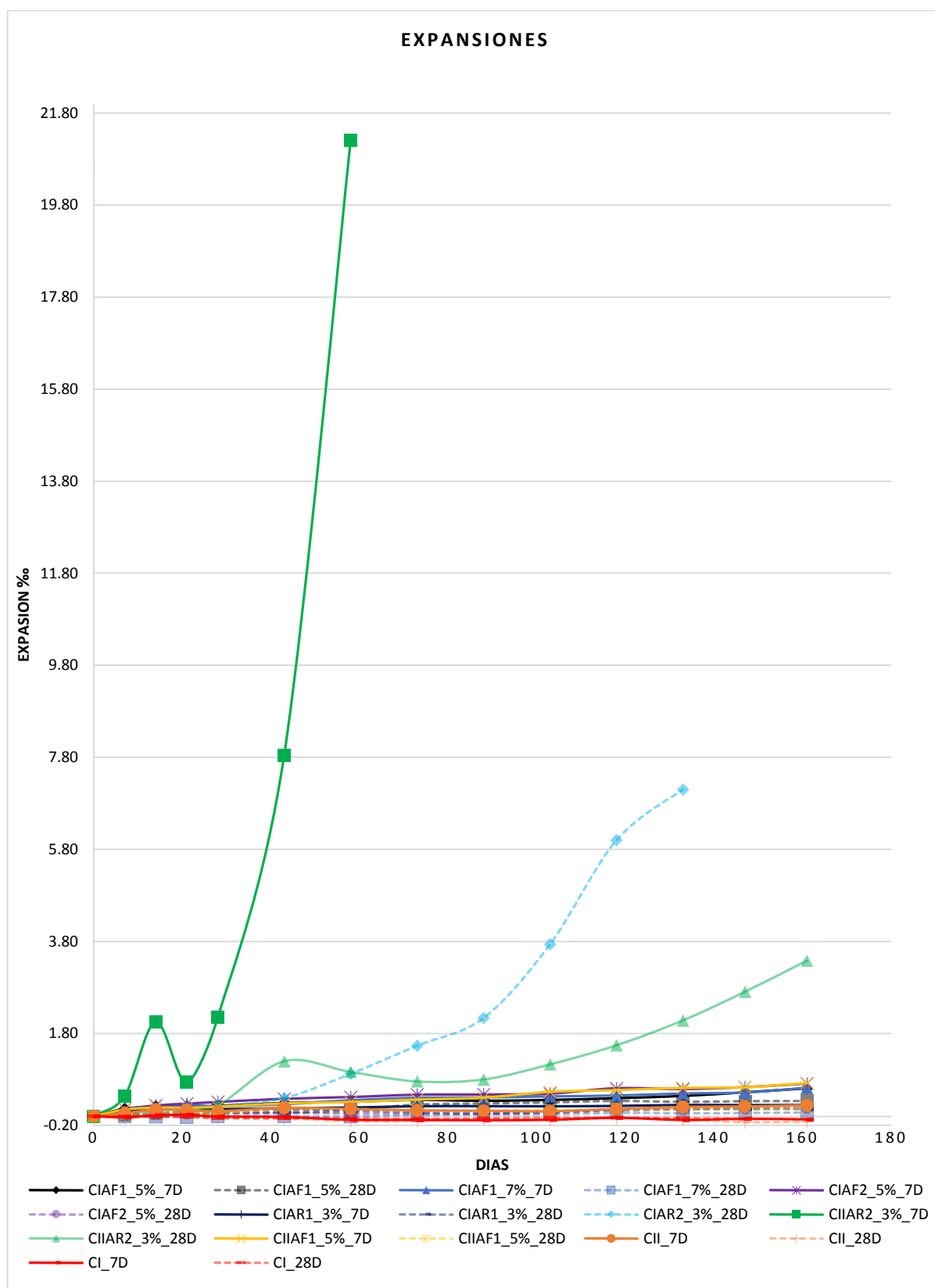


Anejo Figura X Esquema de calibración (CRISON, 2008)

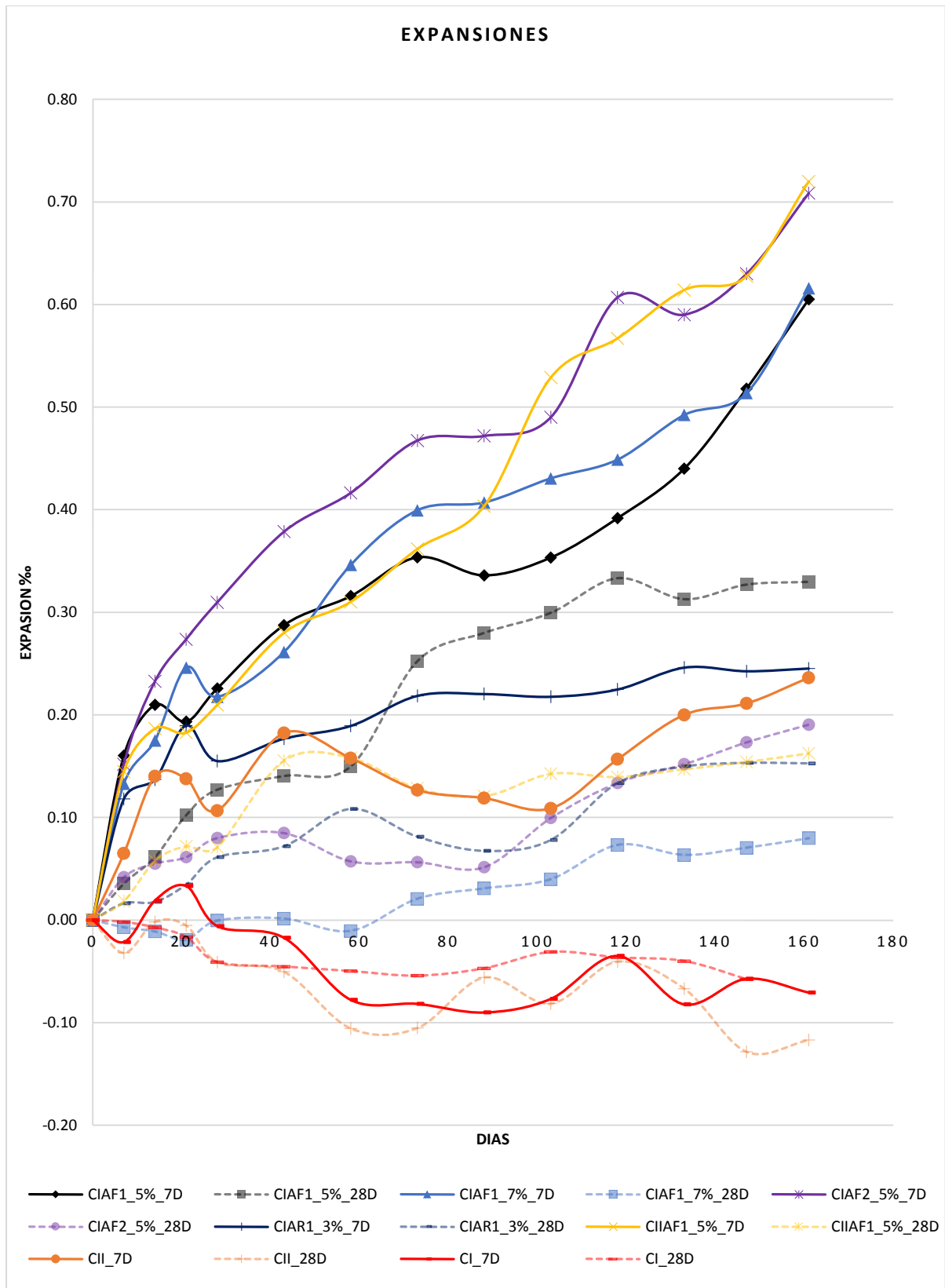


Anejo Figura XI Diagrama de medida de pH

ANEJO C1. INTERACCIÓN ENTRE LAS DIFERENCIAS DE EXPANSIÓN.

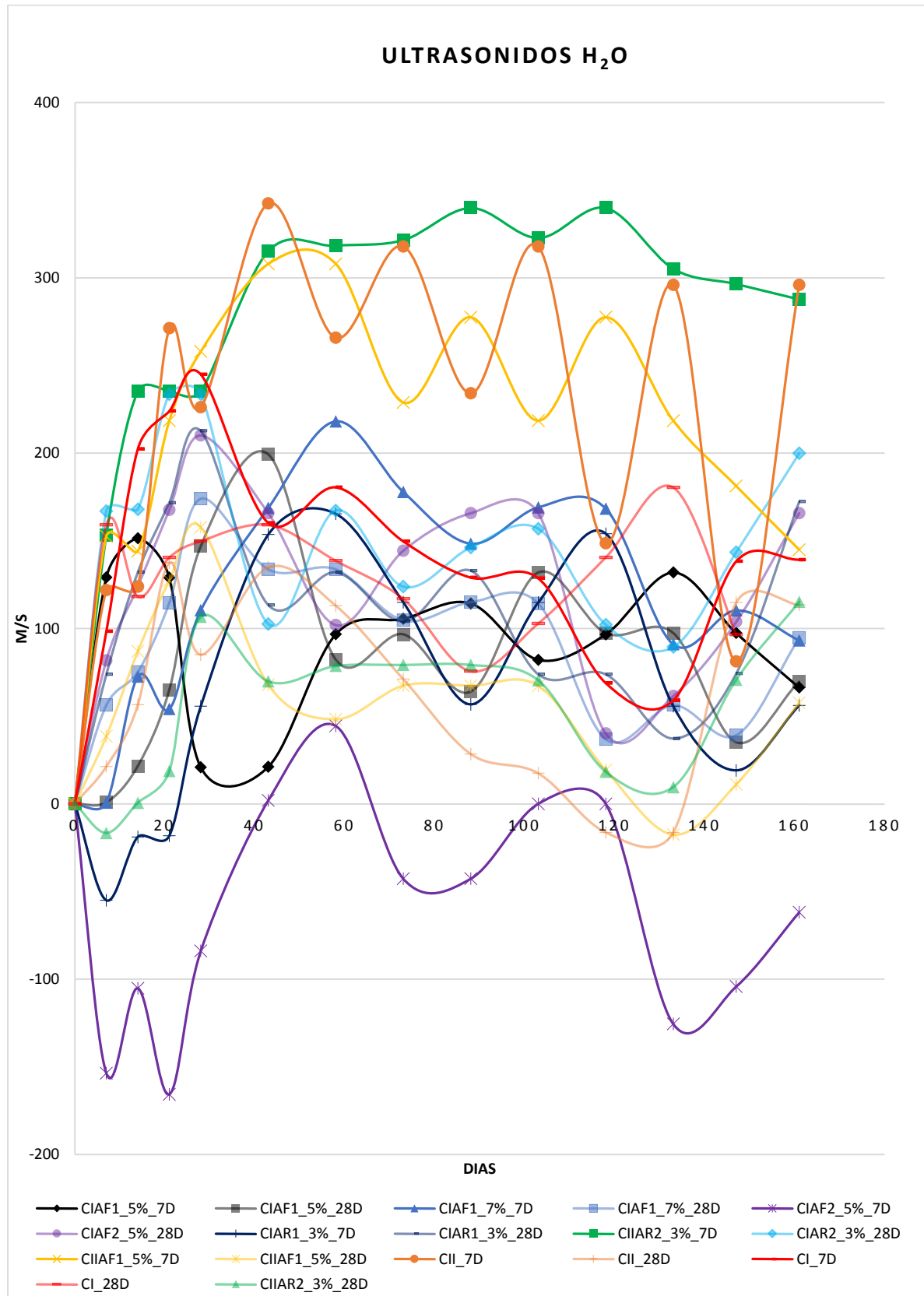


Anejo Figura XII Interacción entre todas las expansiones

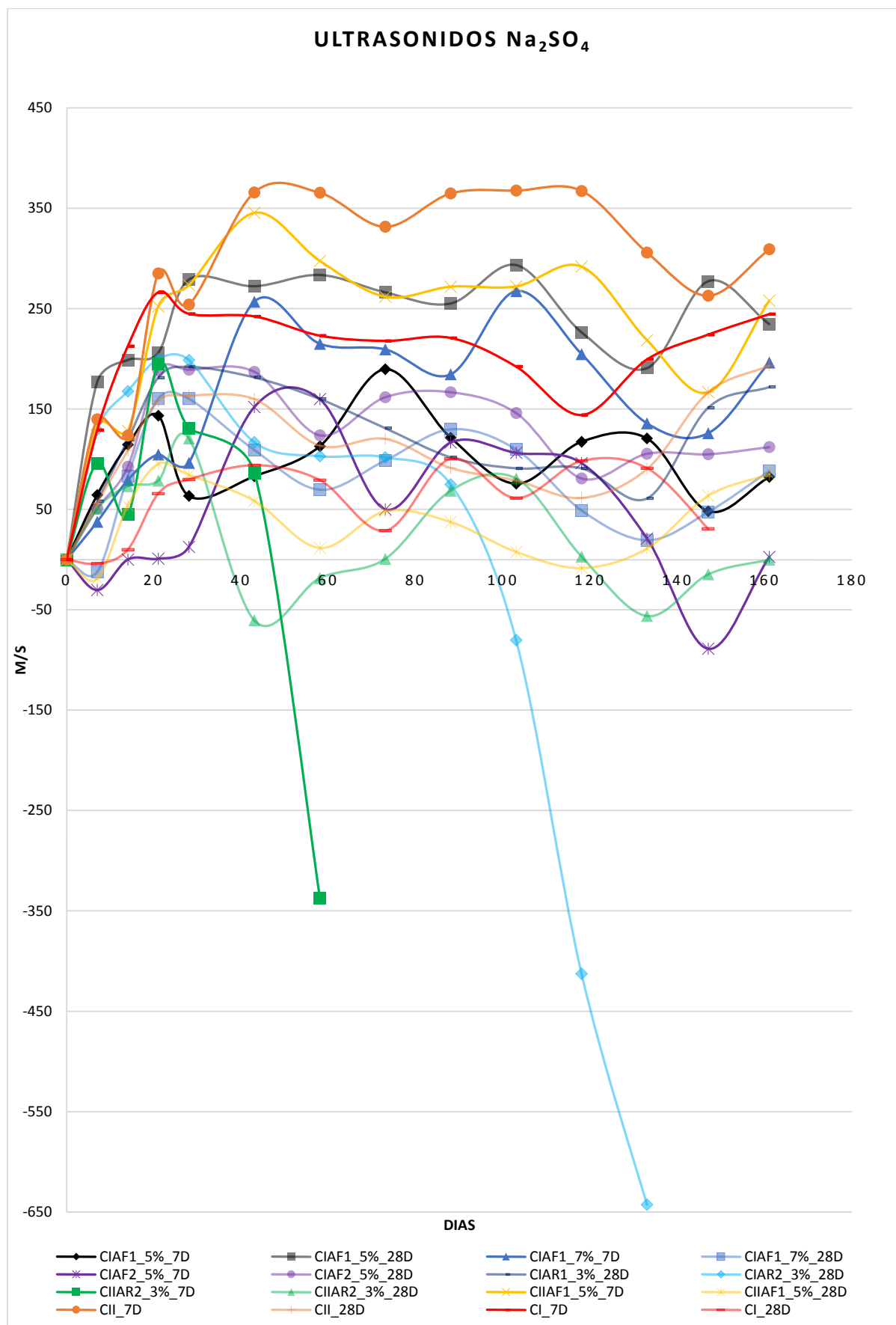


Anejo Figura XIII Interacción sin las expansiones de AR2

ANEJO C2 RESULTADOS DE ULTRASONIDOS.



Anejo Figura XIV Velocidad de onda ultrasónica en agua



Anejo Figura XV Velocidad de onda ultrasónica en sulfato de sodio

ANEJO C3. VELOCIDADES ULTRASÓNICAS OBTENIDAS.

Familias	Velocidad (m/s)
CIAF1_5%_7D	3924.42
CIAF1_5%_28D	3885.40
CIAF1_7%_7D	3743.40
CIAF1_7%_28D	3816.77
CIAF2_5%_7D	4042.95
CIAF2_5%_28D	3905.54
CIAR1_3%_7D	3872.18
CIAR1_3%_28D	3889.38
CIAR2_3%_7D	3701.44
CIAR2_3%_28D	3811.91
CIAR2_3%_7D	3315.77
CIAR2_3%_28D	3608.24
CIAR2_3%_7D	3603.91
CIAR2_3%_28D	3873.92
CII_7D	3699.02
CII_28D	3895.95
CI_7D	3969.73
CI_28D	4118.36

Anejo Tabla VIII Velocidades ultrasónicas obtenidas en día cero.

ANEJO C4. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.

Días	CIAF_5%			CIAF_7%			CIAR_3%		
	fcm	fcmax	fcmin	fcm	fcmax	fcmin	fcm	fcmax	fcmin
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	22.03	25.25	21.11	20.19	24.00	16.87	16.97	20.68	14.30
3	30.13	32.92	27.49	28.19	34.24	18.12	23.59	28.67	18.87
7	28.24	33.29	24.95	29.08	34.24	27.08	21.14	25.99	17.75
28	37.91	39.80	35.16	33.23	39.10	21.07	20.17	22.82	17.88
98	37.63	47.66	30.63	31.10	39.02	22.59			

Anejo Tabla IX Resistencia a Compresión